UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN

INGEGNERIA MECCANICA E MECCATRONICA

___

PROTOTIPAZIONE RAPIDA
Lom Helisys 1015

RAPID PROTOTYPING
Lom Helisys 1015

Relatore: Ch.mo Prof. GUIDO BERTI

Laureando: MARCO GROTTO

Matricola 610756-IMM

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

Sommario

Questa trattazione divisa concettualmente in tre parti, ha lo scopo di introdurre e spiegare il principio base di tutte le tecnologia di Prototipazione Rapida esistenti, analizzare e riparare un macchinario a tecnologia Lom, una Lom Helisys 1015, e gettare le basi per una stampante 3D "home made" a tecnologia Fdm.

La prima parte della trattazione è di fatto un esposizione con lievi approfondimenti delle tecnologie di R.P. mirata e chiarire i principi base di funzionamento e i relativi vantaggi e svantaggi.

Per quanto riguarda la seconda parte della trattazione, l'analisi e la riparazione della Lom Helisys 1015 (situata nei laboratori dell'Università di Vicenza), a causa dei molteplici problemi sorti lungo tutto il percorso di riparazione si è arrivati alla conclusione che l'unica soluzione sia quella di smantellare il macchinario e recuperare tutte le parti che potrebbero essere utili o convertirlo in un macchinario a tecnologia Fdm .

Ed proprio qui che prende forma anche l'ultima parte di questa trattazione, la costruzione di una stampante "home made" a tecnologia Fdm chiamata RepRap Mendel Prusa i2.

Si noterà infatti come molti pezzi derivanti dallo smantellamento/conversione dalla Helysys 1015 siano completamente riutilizzabili nel progetto RepRap.

Indice

Introduzione

Just in Time… oggi giorno questa filosofia di produzione sta condizionando praticamente tutti i settori produttivi. Velocità di progettazione e realizzazione sono i " must" per rimanere competitivi in un mercato in continua evoluzione. Ma non è solo il mercato attuale ad evolversi, bensì anche la richiesta dell'utente finale sempre più esigente: il cliente, infatti, non si accontenta più di un prodotto seriale, ma vuole un prodotto che calzi le sue necessità, che soddisfi ogni requisito, in parole povere, vuole prodotti personalizzati, costruiti e funzionali alle sue esigenze.
Stando ai fatti, il vero problema è che un nuovo prodotto richiede, a grandi linee, una fase di ideazione, una di progettazione, una di prototipazione e, nel caso in cui soddisfi i target progettuali, la realizzazione vera e propria. Oggi si cerca di ridurre sempre di più la fase di prototipazione, da sempre quella che ha richiesto più tempo e anche più investimenti.
Per porre soluzione ai due problemi di tempo e costo si è introdotto all'inizio degli anni ottanta il concetto di "Rapid Prototyping" o R.P.. Come ben specifica il nome, essa tende a ridurre i tempi di realizzazione di un prototipo e, di conseguenza, a ridurne notevolmente il costo.
Ĕ doveroso sottolineare che le macchine per la prototipazione rapida hanno si raggiunto alti livelli di produzione in termini di velocità (pez/h) e in termini di qualità del prototipo (tolleranze dimensionali e geometriche), ma restano pur sempre macchinari costosissimi, acquistabili solo da grandi società e industrie.
Fortunatamente nell'ultimo decennio c'è stata una vera e propria svolta: aziende come la 3D System (leader nella realizzazione di macchinari per la prototipazione rapida di grandi e medie dimensioni) e Makerbot (leader nella realizzazione di macchinari per la prototipazione rapida di piccole dimensioni) hanno cercato sempre più di realizzare Stampanti 3D a basso costo, accessibili quindi a medie e piccole imprese. Usando il termine "stampanti 3D" mi riferirò lungo tutta la mia trattazione alle macchine per il "rapid prototyping", dato che, indipendentemente dalla tecnologia utilizzata, esse sono di fatto considerate stampanti 3D.
Questa tesi nasce per tre scopi: 1) riassumere tutte le tecnologie esistenti di prototipazione rapida evidenziandone vantaggi e svantaggi; 2) descrivere la riparazione e il settaggio di un macchinario a R.P. a tecnologia Lom presente nel laboratorio dell'Università di Vicenza (modello: Lom Helisys 1015; 3) gettare le basi per la costruzione di una stampante 3D "home made" a tecnologia Fdm.

CAPITOLO 1
UNO SGUARDO D'INSIEME

1.0 La prototipazione rapida (R.P.)

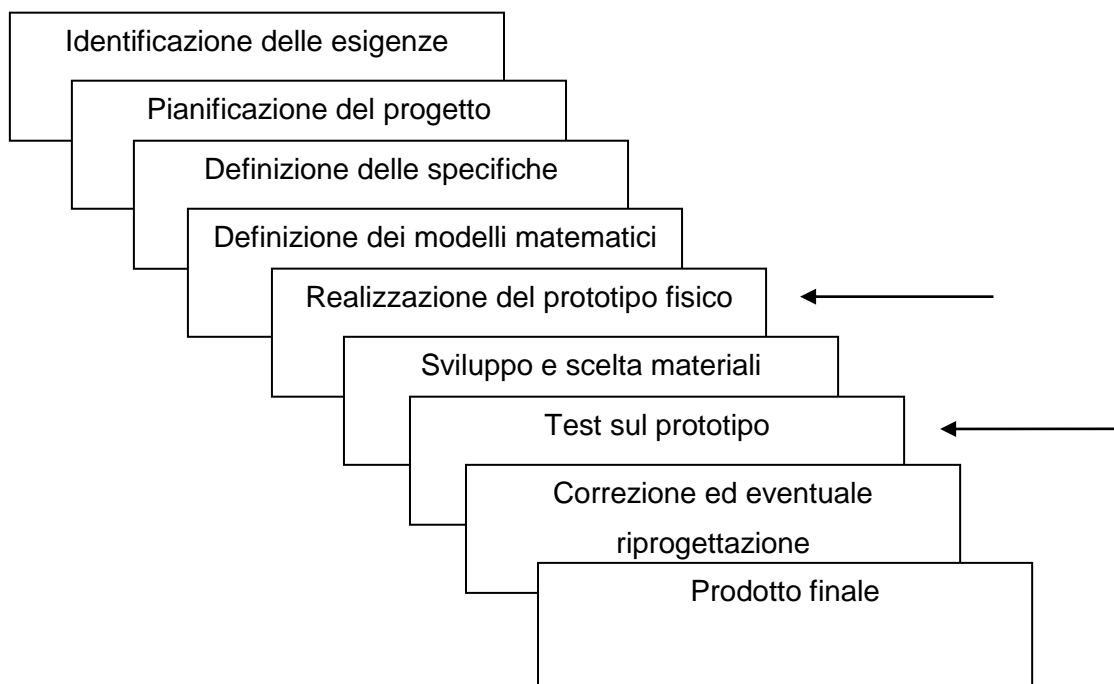
La prototipazione à sempre stata uno dei passi fondamentali per la realizzazione di qualsiasi oggetto.
La possibilità di realizzare oggetti 3D dà enormi vantaggi: ci da l'idea concreta dell'oggetto finale, il suo ingombro, la sua funzionalità e maneggevolezza, individua anche la sua precisione e la sua fattibilità sia in ambito produttivo che in ambito realizzativo.
Perché utilizzare la prototipazione per realizzare un oggetto 3D reale quando in ambito progettuale abbiamo la più svariata scelta di programmi per la modellazione solida? La risposta è molto semplice, passare dal mondo virtuale al mondo reale in ambito progettuale è un notevole passo avanti; scovare eventuali problemi di funzionalità, nel posizionamento del pezzo e soprattutto quelli di montaggio è essenziale per evitare un futuro blocco della linea produttiva, senza contare sul fatto che un modello reale chiarisce e semplifica la verifica concettuale di qualsiasi problema.
Durante la fase *sviluppo di un nuovo prodotto* solitamente vengono realizzate le seguenti tipologie di prototipi:

- Modelli concettuali
- Prototipi per la validazione
- Prototipi tecnici
- Pezzi finali

Per *modelli concettuali* si intende solo la rappresentazione fisica di un modello e le conseguenti valutazione di stile ed ergonomiche, verifiche di progetto, valutazioni di costo.
Per *prototipi per la validazione* si intende invece modelli finalizzati a: test funzionali (aerodinamici ed idrodinamici), prove e verifiche di assemblaggio, *mock up* fisici. Con quest'ultimo si indica l'assemblaggio fisico delle diverse parti in un pezzo di grosse dimensioni e serve per verificare se i componenti sono difficili da montare, se certe distanze tra gli stessi sono sufficienti e se debba essere considerato un certo ordine nelle fasi di assemblaggio.
Per *prototipi tecnici* si intendono quei prototipi che hanno proprietà meccaniche simili ai pezzi finali e che vengono realizzati per: certificazioni, verifiche di durata e verifiche di rispondenza alle norme di sicurezza.
Per *pezzi finali* si intendono produzioni di piccole serie (max 500 pz.) in cui le macchine per la prototipazione realizzano un vero e proprio prodotto finito (si parla di Direct Manufacturing).

Ma abbiamo un' ulteriore funzione delle macchine per il R.P. finora mai citata: essa è denominata *Rapid Tooling*. Essa, infatti, si occupa di quello che viene comunemente chiamato attrezzaggio rapido, cioè la realizzazione di anime, modelli permanenti per Send casting e modelli a perdere (in cera) per Investment casting.

Insomma, la prototipazione rapida non risolve solo il problema oggetto virtuale/oggetto reale ma semplifica moltissimo sia tutto il processo di creazione di un nuovo oggetto sia la sua futura realizzazione.

Robert N. Anthony (2008 pag.20) riassume così le fasi della nascita di un nuovo prodotto:

1.1 R.P. e test funzionali in scala

Nell'immagine sovrastante ho voluto evidenziare oltre alla voce "Realizzazione del prototipo fisico" anche la voce "Test sul prototipo". Come approfondirò più avanti, alcune tecniche di prototipazione permettono la realizzazione di oggetti in grado di sopportare test funzionali.

Ovviamente realizzare i prototipi in scala 1:1 risulta spesso complicato se non addirittura sconveniente dato che le dimensioni dell'oggetto finale sono molto grandi (e di conseguenza essi sono in scala).

Per poter effettuare un test fisico su di un modello in scala Giuseppe Veltrone suggerisce di utilizzare le leggi di affinità. Le leggi di affinità o leggi di similitudine permettono di trasferire i

risultati dello studio e della sperimentazione, condotti su una macchina o su un oggetto assunti come modello, a una o più macchine od oggetti di dimensioni diverse.
Riporto un piccolo esempio per chiarire quanto appena detto: mediante un software per la modellazione solida realizziamo la girante di una turbina Francis. Sappiamo che il battente d'acqua disponibile del nostro bacino è di 100 m.c.a. con una portata di 10 m^3/s e che la nostra turbina dovrà girare a 500 rpm. Ora, noi in laboratorio abbiamo solo 10 m.c.a. disponibili e una portata di circa 0.5 m^3/s.
Dai dati si calcola il *numero tipico di macchina* K = 0.9, da cui si ricavano il numero tipico di pressione e di flusso. Dal numero di pressione otteniamo che la nostra girante reale (progettazione mirata a massimizzare il rendimento idraulico) dovrà avere un diametro esterno di 800 mm. Attualmente realizzare un prototipo in scala 1:1 risulterebbe, come già accennato, scomodo e poco pratico, senza contare sul fatto che lo dovremmo testare con 100 m.c.a. a 10 m^3/s . Inoltre, il nostro laboratorio per i test dispone di soli 10 m.c.a. e di 0.5 m^3/s .
Utilizzando le leggi di similitudine ricaviamo una fattore di scala pari a 3.3, di conseguenza il nostro prototipo sarà realizzato in scala 1:3.3, e quindi con un diametro di 220 mm. Ora, per riprodurre lo stesso fenomeno dinamico, il nostro prototipo, sempre secondo le leggi di affinità, dovrà girare non più a 500 rpm ma a circa 4000 rpm; quindi la curva caratteristica ricavata grazie al prototipo sarà la stessa della turbina reale.

Indicando con:
- F: forza in [N];
- v: velocità in [m/s];
- ρ: densità [Kg/m^3];
- g: accelerazione gravitazionale [m/s^2];
- ω: velocità angolare [rad/s];
- Q_v: portata volumetrica [m^3/s]
- $D_1, D_2, r, l, b_1, b_2 : \ dimensioni\ geometriche\ in\ [m]$;

Leggi d'affinità dove non abbiamo la temperatura come variabile di processo:
$\pi_1 = c_p = \frac{F}{l^2 v^2 \rho}$ noto come coefficiente di portanza;
$\pi_2 = \frac{1}{Re} = \frac{\mu}{l v \rho}$ noto come l'inverso del numero di Reynolds;
$\pi_3 = \lambda = \frac{b}{l}$ noto come rapporto geometrico;
$\pi_4 = \lambda = \frac{r}{l}$ noto come rapporto geometrico;

Leggi d'affinità da usare con fluido incomprimibile e in assenza della temperatura come variabile di processo:

$\pi_1 = \psi_D = \frac{gh}{D_1^2 \omega^2}$ noto come numero di pressione;

$\pi_2 = \Phi_D = \frac{Q_v}{D_1^3 \omega}$ noto come numero di flusso;

$\pi_3 = \frac{1}{Re} = \frac{\mu}{D_1^2 \omega \rho}$ noto come l'inverso del numero di Reynolds;

$\pi_4 = \lambda = \frac{D_2}{D_1}$ noto come rapporto geometrico;

$\pi_5 = \lambda = \frac{b_1}{b_2}$ noto come rapporto geometrico;

Per ulteriori approfondimenti rimando a *Macchine per allievi ingegneri*, Giuseppe Veltrone (2006 pag.72).

Concludendo, grazie alla prototipazione rapida e alla similitudine geometrica e dinamica, siamo in grado non solo di produrre modelli 3D fisici (non virtuali), ma anche veri e propri modelli funzionali in scala.

CAPITOLO 2
TECNICHE PER LA PROTOTIPAZIONE RAPIDA

2.0 Un po' di storia

Alla fine degli anni Settanta gli americani Herbert e Hull e il giapponese Kodama svilupparono (indipendentemente) un sistema di solidificazione selettiva di un fotopolimero per costruire un oggetto tridimensionale per strati successivi, tutt'oggi sono considerati come i pionieri del R.P.

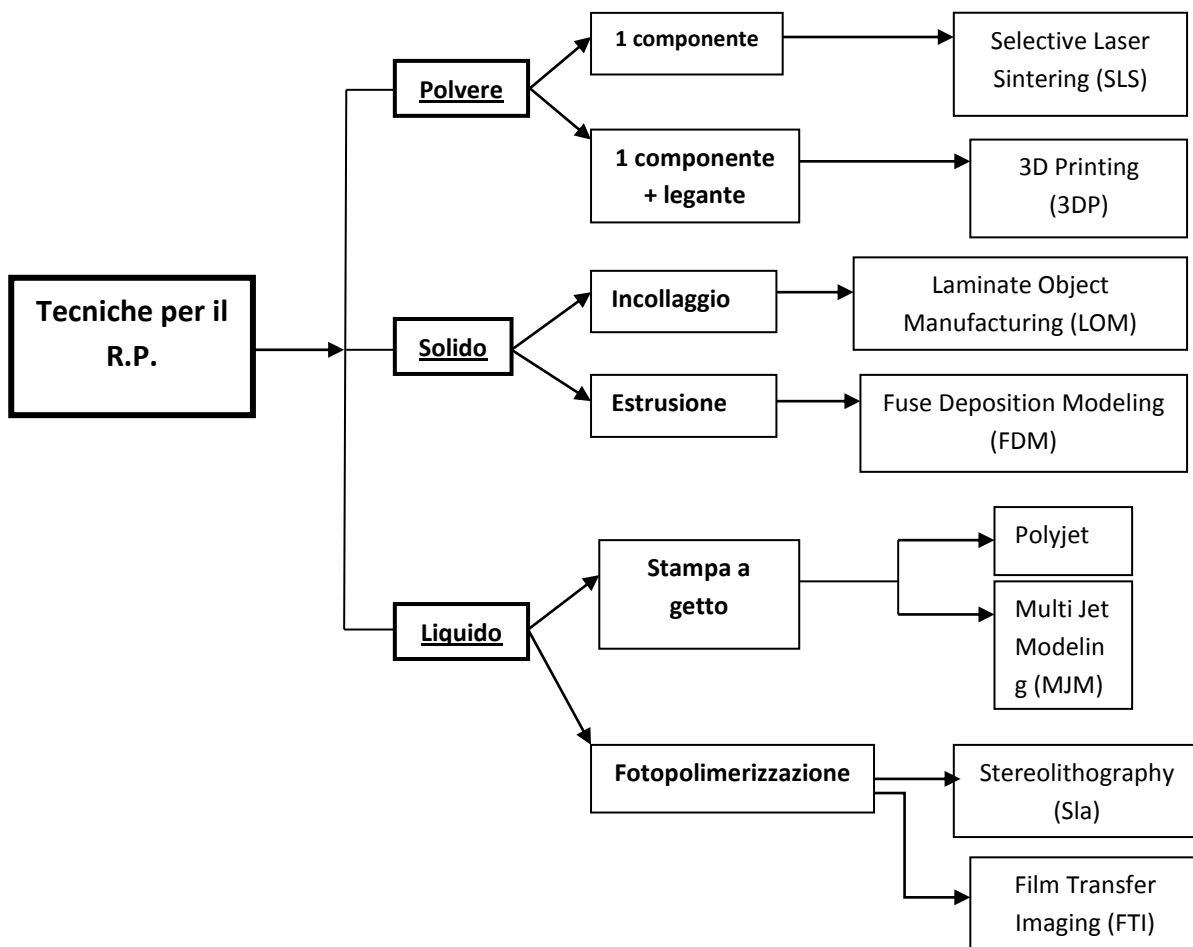
- ❖ 1986: Hull brevetta un sistema che chiama “stereolitografia"
- ❖ 1986-87: si sviluppa la maggior parte dei sistemi alternativi di prototipazione rapida;
- ❖ 1987: la 3D System presenta la prima macchina (SLA1);
- ❖ 1989: la macchina SLA 250 viene posta in commercio dalla 3D System;
- ❖ 1991-93: vengono commercializzate le macchine della Cubital, DTM, EOS, Helysys, Stratasys con tecnologie alternative alla stereolitografia per la costruzione di prototipi;
- ❖ 1994: la Sanders commercializza la prima macchina RP avente un costo inferiore ai 100.000$;
- ❖ 1996: la 3D System e la Stratasys introducono sul mercato I modellatori concettuali da destinare all’ufficio tecnico;
- ❖ 1996-2002: implementazione e diffusione in tutto il mondo di nuove tecniche di RP

2.1 Tecnologie di RP e aspetti preliminari

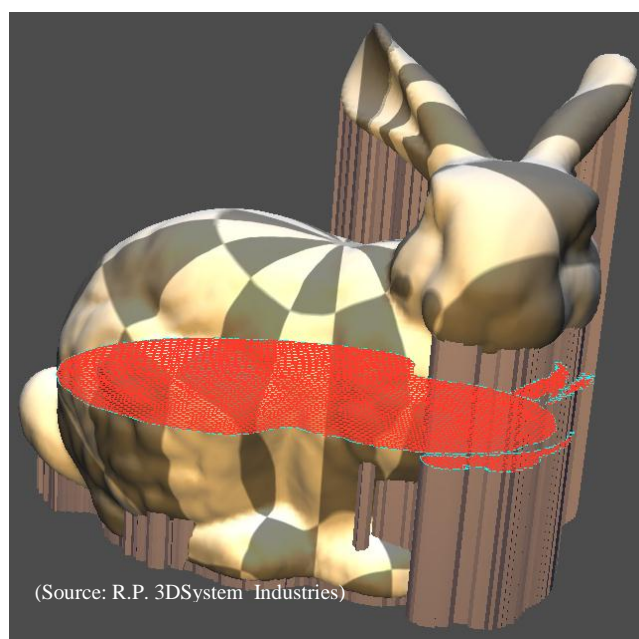
Prima di addentrarci nel vasto mondo del RP è essenziale specificare ed analizzare come avviene il passaggio dal mondo virtuale a coordinate macchina. Tutto parte dalla modellazione solida, utilizzando un qualsiasi programma per la modellazione 3D (alcuni esempi: Creo, Solidworks, Solid edge, Autocad 3D, ecc...); una volta ultimato l'oggetto da prototipare lo salviamo in un file la cui estensione non ha importanza (infatti, cambiando programma di modellazione solida cambiano anche le estensioni es: .dwg, .dxf, ecc..). Qui subentra il software della macchina che come prima cosa converte il formato .xxx (lo chiameremo .xxx per rappresentare tutti i formati) in un formato .stl (Standard Triangulation Language); molto spesso nei programmi di modellazione solida è possibile salvare l'elaborato 3D direttamente in formato .stl . Un file .stl rappresenta un solido la cui superficie è stata discretizzata in triangoli: esso consiste delle coordinate X, Y e Z ripetute per ciascuno dei tre vertici di ogni triangolo, con un vettore per descrivere l'orientazione della normale alla superficie. Il formato STL presenta dei vantaggi quali la semplicità, in quanto risulta molto facile da generare e da processare, mentre a suo sfavore presenta una geometria approssimata e una struttura dati, che pur risultando semplice, può

presentare la ripetizione dello stesso vertice più volte. Ci sono vari modi per classificare i processi di prototipazione, uno fra tutti quello che utilizza lo stato fisico del materiale di partenza (se solido liquido o polvere):

Tecniche per il R.P.

- **Polvere**
  - **1 componente** → Selective Laser Sintering (SLS)
  - **1 componente + legante** → 3D Printing (3DP)
- **Solido**
  - **Incollaggio** → Laminate Object Manufacturing (LOM)
  - **Estrusione** → Fuse Deposition Modeling (FDM)
- **Liquido**
  - **Stampa a getto** → Polyjet; Multi Jet Modelin g (MJM)
  - **Fotopolimerizzazione** → Stereolithography (Sla); Film Transfer Imaging (FTI)

Come seconda operazione il software della macchina prende il modello in formato .stl e procede a sezionarlo lungo un determinato asse . Questa operazione è chiamata *slicing*, essa consiste nel dividere il nostro oggetto 3D in piani che racchiudono un'immagine ora bidimensionale in cui sono tracciati solo i contorni.

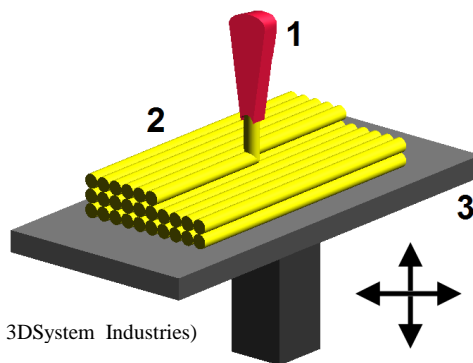
(Source: R.P. 3DSystem Industries)

La terza fase è denominata "Final Built File" e si occupa del riempimento delle immagini dei vari piani (sovrapponendo tutti questi piani otteniamo il nostro

solido di partenza).

La quarta ed ultima fase consiste nel creare eventuali sostegni al solido che andremo a costruire; questa operazione è richiesta solo da alcune tecnologie, come la Fdm, Polyjet e Sla. Tutto ciò poi è convertito, mediante l'utilizzo di un programma CAM, in coordinate macchina che andranno a muovere il nostro estrusore nella Fdm, il nostro laser nella Sls, Sla o Lom, il nostro ugello in Polyjet o 3DP. Come si nota dall'immagine precedente, lo strato rosso mostra lo *slicing* dove è già stata effettuata l'operazione di riempimento, inoltre si nota già l'apporto delle strutture di sostegno.

2.2 Fuse deposition modeling (Fdm)

La tecnica Fdm (Fuse deposition modeling) è sicuramente quella più semplice tra tutte le tecniche disponibili, infatti, essa altro non richiede che un polimero termoplastico (ABS, PLA, PC, PC-ABS) e un estrusore munito di resistore. Quest'ultime fondono il polimero che viene spinto da un cilindro zigrinato all'interno dell'estrusore per produrre infine un piccolissimo estruso cilindrico di polimero fuso, il quale, una volta estruso, solidifica un istante dopo essere stato depositato; tutto il processo procede per strati.

Figura:
1-estrusore
2-polimero estruso e solidificato
3-piano d'appoggio.

(Source: R.P. 3DSystem Industries)

La risoluzione dello strato depositato si aggira intorno ai 120÷275µm. Ed è proprio lo spessore dello strato a determinare il limite della precisione di questa tecnologia di prototipazione; infatti, il controllo sulla movimentazione riesce ad essere molto accurato con un errore sul posizionamento X,Y e Z non superiore a 20µm.

2.2.1 Gestione e movimentazione assi

Prima di entrare nello specifico dobbiamo distinguere nel mondo delle macchine per R.P. a tecnologia Fdm due grandi gruppi: il primo è dedicato alla prototipazione di grandi oggetti (che superano 2 m^3 di ingombro, fig A) ed il secondo dedicato alla prototipazione di medi e piccoli oggetti.

Il primo gruppo, dovendo creare oggetti di notevoli dimensioni, lavora con un braccio robotico a 6 assi, il quale permette di creare elementi molto articolati. Questo braccio scorre su binari

paralleli al piano porta pezzo che in questo caso è solidale al basamento del macchinario (esso non compie alcun movimento).

Per il secondo gruppo, che si occupa della prototipazione di oggetti di medie-piccole dimensioni, si adotta una modalità di movimentazione gestita solo su 3 assi: X, Y, Z. Il piano porta pezzo si occupa dello spostamento nel senso verticale, asse Z, mantenendo costanti il valore di X ed Y, l'estrusore invece, al contrario del piano porta pezzo, mantiene sempre la stessa coordinata Z e si occupa degli spostamenti in X e Y. Chiariamo meglio quanto detto: l'estrusore lavora in due dimensioni, mentre ciò che in realtà dà la vera e propria tridimensionalità al nostro pezzo è proprio lo spostamento in Z del piano porta pezzo.

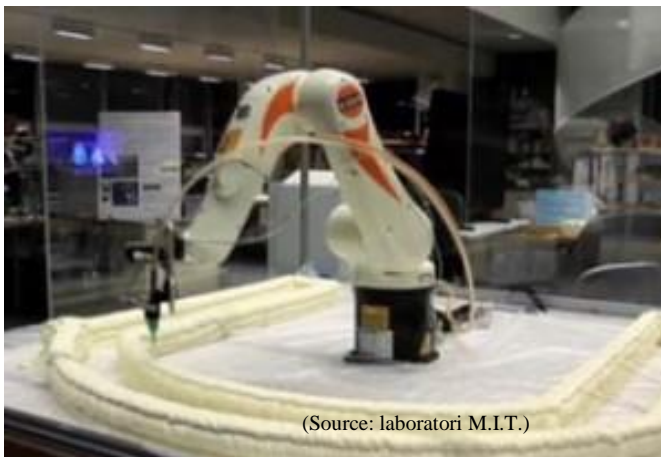
Ovviamente il primo tipo di configurazione, quella che utilizza il braccio robotico è utilizzata in rari casi, mentre la seconda configurazione, quella che utilizza solo 3 assi è assai meno costosa e largamente utilizzata. Le stampanti acquistabili per uso domestico sono praticamente tutte a tecnologia Fdm e utilizzano tutte la seconda configurazione.

(Source: laboratori M.I.T.)

Figura A

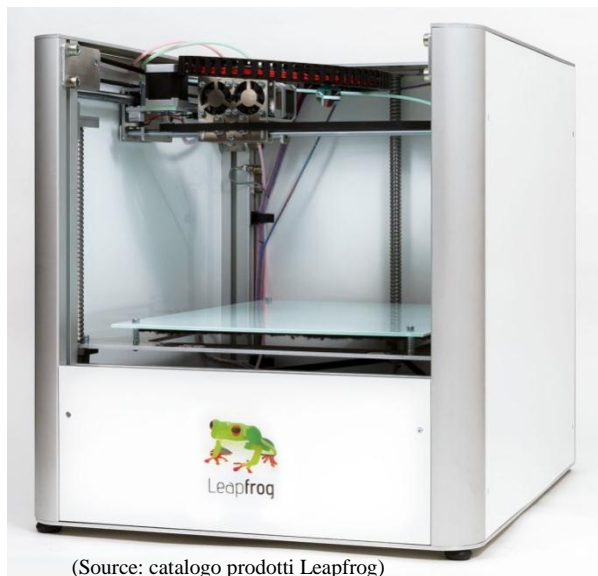
Nell'immagine qui a fianco è riportata una macchina per la prototipazione 3D a tecnologia Fdm che adotta la prima configurazione, quella con braccio robotico a sei assi.

(Source: catalogo prodotti Leapfrog)

Figura B

Nell'immagine qui a fianco è riportata una macchina per la prototipazione 3D a tecnologia Fdm che adotta la seconda configurazione, quella a tre assi.

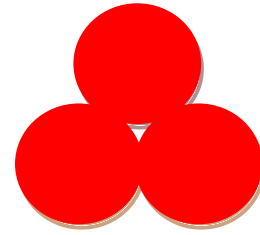
2.2.2 Temperature e velocità

Prima di iniziare il processo di prototipazione vero e proprio ci sono tre fasi essenziali che la macchina deve eseguire: la prima consiste nell'allineamento piano/ugello in modo che, una volta fissata la coordinata Z del piano, tra ugello e piano d'estrusione ci sia esattamente la stessa distanza lungo tutti i punti del piano (si usa solitamente uno spessimetro); la seconda consiste nel riscaldamento del piano d'appoggio da dove partirà la creazione del pezzo (ad una temperatura che è circa la meta della temperatura di fusione del polimero utilizzato, vedi tabella sottostante) e l'ultima fase consiste nel riscaldamento dell'estrusore e nella pulizia di quest'ultimo.
Per quanto riguarda le velocità di spostamento in X e Y dell'estrusore (chiamate velocità di prototipazione) si possono avere diversi valori in dipendenza alla qualità superficiale e al valore di riempimento che si vogliono ottenere sul prototipo in costruzione (velocità tipiche oscillano tra 150 a 350 mm/s). Per quanto riguarda la velocità dell'estruso, essa determina la portata di polimero fuso che fluisce dall'ugello; il suo valore è solitamente impostato di poco superiore alla velocità di prototipazione.

Polimero	***Sigla***	***T fusione (°C)***	***UTS (MPa)***	***Young's modulus (GPa)***
Acrilonitrile Butadiene Stirene	ABS	210÷230	22	1.63
Acido Polilattico	PLA	130÷160	9÷10	2.81
Policarbonato	PC	230÷240	52	3

2.2.3 Vantaggi e svantaggi

I vantaggi della R.P. a tecnologia Fdm sono molti: sicuramente il più rilevante rimane la semplicità e la relativa economicità rispetto alle altre tecnologie di prototipazione, sia per quanto riguarda la realizzazione dei prototipi sia per quanto riguarda il costo del macchinario stesso. Altri vantaggi sono la velocità di produzione (in pez/h) e il fatto che il prototipo uscente dal macchinario non necessita di alcun trattamento finale (se non la rimozione di eventuali sostegni), ne di pulizia ne di eventuali sabbiature (confronta con tecnologie Sla e Sls).
Gli svantaggi purtroppo coincidono con i limiti di questa tecnologia: primo fra tutti l'incapacità di realizzare un pezzo pieno, o meglio, in completa assenza di porosità; infatti, come si può constatare dalla figura a lato, il fatto che l'estrusore depositi un cilindro continuo di polimero fuso

comporta inevitabilmente la creazione di intercapedini tra i vari filamenti estrusi e solidificati. Volendo esagerare il concetto si prenda ad esempio tre cerchi mutuamente tangenti, tra essi per quanto piccoli possano essere sarà sempre presente un' intercapedine (vedi figura a lato).

Tutto questo incide molto sulla resistenza e sul possibile utilizzo del nostro prototipo in test funzionali. Nonostante ciò, grazie all'utilizzo dell'ABS e con velocità di produzione molto lente (estremamente lente) riusciamo ad avere riempimenti che in pratica sfiorano il 97%.

Un altro limite di questa tecnologia consiste nel fatto che non è possibile usare più di due colori alla volta (tutte le macchine per R.P. a tecnologia Fdm montano al massimo 2 estrusori per problemi di ingombro ed inerzie), quindi nel prototipo finale compariranno al massimo due colori (distinti e non miscelati). Un ulteriore svantaggio è la possibile creazione di bave e sbavature che possono compromettere la finitura superficiale del pezzo, esse sono presenti quando il prototipo in costruzione presenta struttura a sbalzo. Per ovviare al problema si procede con l'aggiunta di strutture di sostegno.

2.3 Stereolithography (Sla)

La tecnica Sla (stereolitografia), a differenza della Fdm, non prevede la fusione di un polimero solido, bensì la solidificazione di un fotopolimero liquido; quest' ultimo, infatti, viene posto in un recipiente, e un fascio laser, con intensità pari all'energia richiesta dal polimero per reticolarsi, investe lo stesso fotopolimero e lo reticola solidificandolo. Anche la Sla, come la Fdm, è un processo per strati.

Nel mercato sono presenti moltissime ricette per comporre un fotopolimero in base alle proprie necessità, da quelli ultraresistenti con valori di UTS che sfiorano gli 80 MPa, fino a quelli meno prestazionali che hanno una UTS intorno ai 32 MPa. L'errore sul posizionamento del laser è compreso tra un massimo di 17 e un minimo di 2μm. Ciò che però limita notevolmente l’assoluta precisione del pezzo è lo spessore minimo di fotopolimero che il laser riesce a solidificare (esso si aggira intorno ai 100÷150μm).

2.3.1 Gestione e movimentazione assi

Tutto inizia dal piano porta pezzo immerso nel foto polimero. Anche in questo caso abbiamo due configurazioni possibili: nella prima il piano porta pezzo è rivolto verso l'alto e, man mano che il laser solidifica il polimero, esso affonda sempre più ricoprendo le parti fotoindurite con polimero non reticolato (fig. 1); la seconda configurazione, invece, prevede che il piano porta pezzo sia

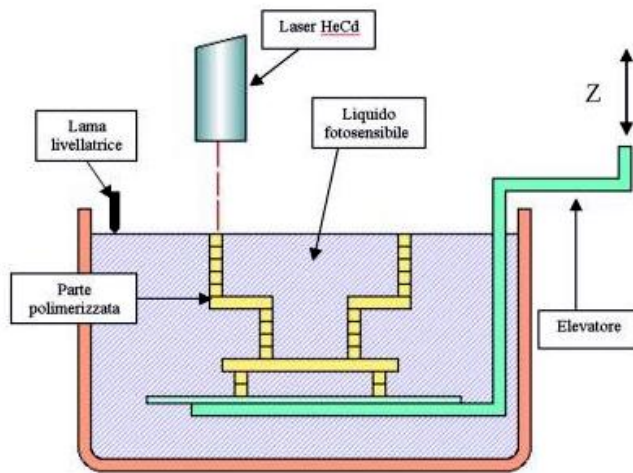
rivolto verso il basso e, che man mano che il laser solidifica gli strati di polimero, esso si sposti verso l'alto uscendo dalla vasca che contiene il fotopolimero (fig. 2).

(Source: Xpolimers company)

Figura 1

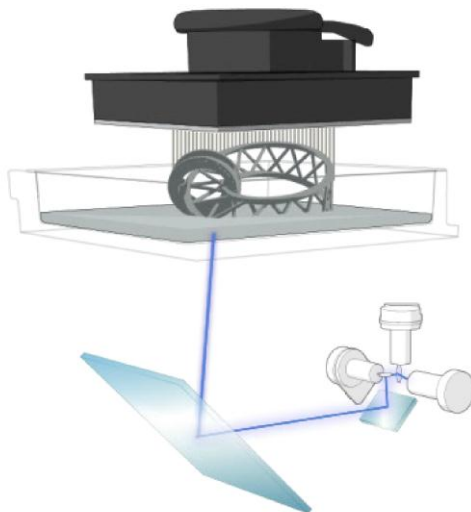
Come si può facilmente notare, l'elevatore (o piano porta pezzo) durante la creazione del prototipo affonda di uno spessore pari allo spessore del polimero fotoindurito. La lama livellatrice (più comunemente nota con il nome di racla) garantisce che il fotopolimero da solidificare ricopra interamente le superfici lavorate e sia di egual spessore.

(Source: laboratory of Formlab)

Figura 2

In questa immagine, invece, si nota come l'elevatore proceda verso l'alto durante la creazione del pezzo. Si noti anche la struttura di sostegno per la creazione del pezzo.

Quindi, nonostante queste due possibili configurazioni, si nota facilmente che lo spostamento in Z è affidato proprio al piano portapezzo mentre al laser è affidato lo spostamento in X e in Y. La fonte laser è ovviamente fissa (solitamente sono laser a He-Cd, Laser Elio Cadmio) e un sistema di specchi si occupa di focalizzare il laser nei punti in cui va solidificato il fotopolimero.

Per quanto riguarda la movimentazione degli assi, rispetto alla tecnologia Fdm non abbiamo sostanziali modifiche solo che al posto di usare un estrusore viene usato un fascio laser.

2.3.2 Radiazioni e solidificazione

Nel processo di prototipazione a tecnologia Sla, come già evidenziato in precedenza, non entrano in gioco variazioni di temperature: al foto polimero, infatti, non viene somministrata energia

sottoforma di calore bensì sottoforma di radiazione. Il polimero richiede una determinata quantità di energia per polimerizzarsi. L'energia del laser viene assorbita dal polimero, in accordo alla legge di Beer-Lambert; l'esposizione decresce esponenzialmente con la profondità secondo la relazione:

$E(z) = E_0^{\frac{-z}{D_p}}$ dove :

- E_0 è l'esposizione in energia per area della superficie (z = 0);
- D_p è la profondità di penetrazione del laser ad una specifica lunghezza d'onda, essa è una caratteristica del polimero;
- z è la profondità a cui si vuole calcolare l'esposizione;

Alla profondità di reticolazione, il polimero viene esposto ad una energia per area sufficiente per essere trasformato in gel, o

$E_c = E_0^{\frac{-c_d}{D_p}}$ dove :

- E_c è l'esposizione necessaria per trasformare il liquido in lavorazione in un gel;
- C_d è la profondità di reticolazione;

Risolvendo il tutto per la profondità di reticolazione otteniamo:

$$C_d = D_p \ln(\frac{E_0}{E_c})$$

che rappresenta lo spessore al quale il materiale ha polimerizzato trasformandosi in un gel.
Qui subentra il software di controllo che appositamente sovrappone gli strati in modo che una zona trasformata in gel riceva ancora radiazioni solidificandosi quasi completamente.
Riporto nella tabella sottostante alcuni dei fotopolimeri maggiormente utilizzati:

Fotopolimero	***UTS* (MPa)***	***Young's modulus* (GPa)***
Somos 7120a	63	2.59
Somos 9120a	32	1.14÷1.55
WaterSheld 11120	47÷53	2.65÷2.88
Prototool 20Lb	72÷79	10.1÷11.2

*Questi valori sono stati ricavati da provini completamente reticolati mediante camera a lampade UV.

2.3.3 Vantaggi e svantaggi

I vantaggi di questa tecnologia di prototipazione risiedono solo sul pezzo finito. In altre parole, i macchinari per la stereolitografia sono molto costosi, difficili da calibrare e sopratutto i polimeri utilizzati non sono certamente economici; al contempo il pezzo finito ha ottime finiture superficiali, ottime tolleranze geometriche e dimensionali rispetto al modello virtuale 3D.
Al contrario della tecnologia Fdm, con la tecnologia Sla è possibile realizzare forme molto più complesse, i sostegni possono essere ridotti moltissimo dato che lo stesso liquido funge da sostegno per la superficie in creazione.
Per quanto riguarda gli svantaggi ce ne sono tre di veramente rilevanti: il primo consiste nel fatto che il pezzo finito deve essere lavato dal polimero liquido in eccesso che ancora lo bagna; il secondo è che per ottenere le resistenze precedentemente elencate (vedi tabella sovrastante) tutto il polimero deve essere ben reticolato, ciò è possibile solamente ponendo il pezzo in una camera a lampade fluorescenti per un determinato periodo (esso dipende dallo spessore massimo dell'oggetto).
Come citato in precedenza, la tecnologia Sla ha due configurazioni (cfr.§2.3.1); la differenza sostanziale tra le due è che la prima richiede un' enorme vasca e grandi quantità di fotopolimero, (infatti il piano porta pezzo, affondando sempre più, spazia un volume considerevole), mentre la seconda configurazione richiede una vasca molto meno voluminosa, essa di fatto deve contenere solo il liquido per la creazione del modello e, solo per la fase iniziale, anche il piano portapezzo. Meno volume significa meno fotopolimero con cui riempire la vasca, quindi la seconda configurazione è da preferire se si vogliono limitare i costi di prototipazione.
Tra le due configurazioni c'è ancora un'altra sostanziale differenza: la prima richiede una racla per assicurare che sulla superficie polimerizzata si distribuisca il nuovo polimero da polimerizzare; al contrario, la seconda sfrutta sia il fatto che la superficie del pezzo in lavorazione sia completamente sommersa, sia l'effetto capillare che la porzione di prototipo reticolato compie sul fotopolimero (l'apporto di nuovo fotopolimero avviene in modo naturale ed automatico, quindi il macchinario è più semplice e meno costoso).

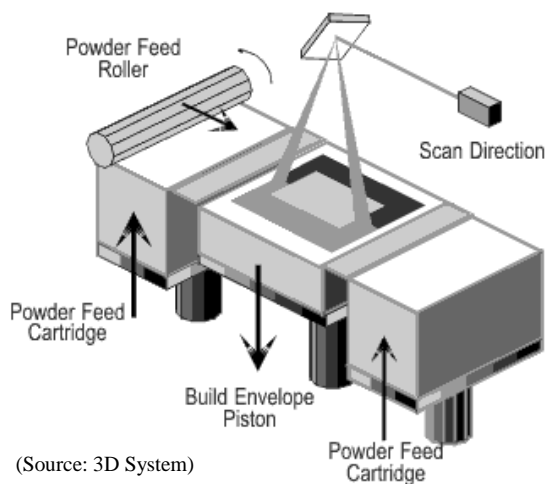
2.4 Selective laser sintering (Sls)

La tecnologia Sls (selective laser sintering) a differenza della tecnologia Sla non parte da un fotopolimero liquido, ma da una polvere ultrafina che può essere di :polimero termoplastico, metallo, sabbia ista polimero o di ceramico. Il principio di funzionamento è relativamente semplice: uno strato di polvere viene steso e rullato con cura in modo da creare un piano uniforme; subito dopo un laser fornisce il calore necessario affinché nel punto colpito avvenga la

fusione, nel caso stessimo utilizzando polveri di polimero termoplastico, o una sinterizzazione, nel caso stessimo utilizzando polveri metalliche o ceramiche.

Le polveri tipicamente utilizzate possono essere: ABS, Nylon, PVC, cere, Resine epossidiche, alluminio, leghe d'acciaio, bronzo, titanio, tungsteno, zirconia, allumina, carburo di silicio e sabbie da fonderia (per alcuni materiali ceramici si è ancora in fase di sperimentazione).

Si parla di processo DLS, *Direct Laser Sintering*, se la sinterizzazione avviene durante la creazione del prototipo (richiede laser al CO_2 molto potenti), altrimenti si parla di ILS, *Indirect Laser Sintering*, quando la vera e propria sinterizzazione avviene dopo la creazione del prototipo in un forno apposito. Per il secondo tipo di procedura, la ILS, le polveri di metallo, di ceramico o di sabbia da fonderia, contengono al loro interno una percentuale di polimero e sarà proprio questo che permetterà al laser di legare la polvere; infatti, il pezzo finito sarà sì di metallo, di ceramico o di sabbia ma il vero legante tra tutte le particelle è il polimero. Successivamente, mediante la cottura in forno del pezzo si fa subliminare o evaporare il polimero procedendo con la vera e propria sinterizzazione. Ovviamente, l'errore sul posizionamento del laser dipende molto dal costo del macchinario, valori tipici si aggirano intorno ai 5÷10 µm per le polveri metalliche mentre per polimeri attorno ai 40÷100µm.

(Source: 3D System)

2.4.1 Gestione e movimentazione assi

Rispetto ai casi precedenti la Tecnologia Sls prevede una sola configurazione standard come quella in figura. La creazione del pezzo avviene dal basso verso l'alto: il piano porta pezzo, prima del passaggio del rullo, abbassa il nostro oggetto; i dispenser di polvere, invece, salgono mostrando un nuovo strato di polvere; il rullo controrotante spalma questo strato lungo tutto il piano portapezzo e lo compatta; il laser, in seguito, procede con la sinterizzazione o fusione.

Come si nota nella figura ci sono due serbatoi di polvere in modo da poter avere un processo di distribuzione di polvere più efficiente, infatti, il rullo ad ogni "cambio lato" esegue una distribuzione di polvere. Nelle prime macchine non era presente il secondo serbatoio di polvere e il rullo doveva compiere due volte lo stesso tragitto allungando di molto i tempi di prototipazione.

Per quanto riguarda la movimentazione del laser non cambia praticamente nulla rispetto alla tecnologia Sla, se non per la potenza del laser. (cfr.§2.3.1).

2.4.2 Microfusioni/Sinterizzazione e rullatura

Ciò che rende questa tecnologia innovativa e molto apprezzata sotto tutti i punti di vista è proprio il principio base con cui essa funziona. La sinterizzazione come processo di creazione partendo da polveri metalliche o ceramico, è un processo rivoluzionario sotto molti punti di vista. Enormi passi avanti si sono compiuti per la sinterizzazione di polveri garantendo ottimi prototipi con ottime proprietà meccaniche. Il vantaggio di una sinterizzazione rispetto ad una fusione è che non si è costretti a cedere calore a temperature molto elevate come durante una normale fusione. Le temperature si aggirano intorno ai $\frac{2}{3}\,T_m$, dove con T_m si intende la temperatura di fusione del metallo o ceramico utilizzato. Tutto ciò è dovuto al fatto che la sinterizzazione è un processo energeticamente favorito. Non dobbiamo, però, confonderci: parliamo di vera e propria sinterizzazione solo per le polveri metalliche, invece per i polimeri avviene la microfusione; si continua ad usare impropriamente il termine sinterizzazione dato che anche il polimero viene utilizzato sottoforma di finissima polvere.

Durante il processo di sinterizzazione, l' energia di superficie per unità di volume è tanto più elevata quanto più piccoli sono i grani di polvere. Questo implica che se un grano di polvere si unisce ad un altro c’è un aumento di volume, ma una diminuzione di superficie ed una conseguente diminuzione dell’energia; l'energia liberata viene messa a disposizione proprio per la coalescenza del grano di polvere successivo.

Dobbiamo sottolineare il ruolo essenziale del rullo, la cui azione di distribuzione/compattazione influisce sulla finitura superficiale del prototipo e sulle sue caratteristiche meccaniche: l’aumentare della compattazione accresce la tensione superficiale tra i grani di polvere, favorendo quindi la rimozione delle porosità e lo sviluppo di forti legami tra le particelle. Nelle polveri metalliche viene aggiunto un lubrificante per facilitare l'azione di compattazione del rullo, esso varia dal 0,5 al 5% sul peso della polvere. Il lubrificante più comunemente usato è l'acido Stearato di zinco, $C_{36}H_{70}O_4Zn$).

Qui di seguito sono elencati le polveri comunemente usate:

Materiali	**Presenza di lubrificante**	**Sinterizzazione diretta (DLS)**	**Sinterizzazione indiretta (ILS)**
Polistirene	no	solo diretta	/
P12 fine	no	Solo diretta	/
P12 caricato vetro	no	solo diretta	/
DSM Somos 201	no	solo diretta	/
Leghe d'alluminio	si	prevalentemente	si
Leghe di bronzo	si	si	prevalentemente

Leghe di acciaio	si	si	prevalentemente
Titanio	si	raramente	prevalentemente
tungsteno	si	raramente	prevalentemente
Sabbie da fonderia	no	no	solo indiretta

2.4.3 Vantaggi e svantaggi

Tra tutte le tecnologie di R.P. questa è sicuramente la più apprezzata e versatile: essa infatti, può utilizzare non solo materiali polimerici termoplastici ma anche polveri metalliche come quelle di titanio, alluminio, magnesio e zinco.
Solitamente i prototipi derivanti da polveri metalliche (es. Ti) sono dei veri e propri prodotti finiti poiché essi vengono successivamente applicati all'interno di macchinari o altri dispositivi meccanici. La Tecnologia Sls infatti, è nata come tecnologia di prototipazione ma oggigiorno è utilizzata sempre più come macchina di produzione, ovviamente non per la produzione a lotti, bensì per la produzione di pezzi singoli e complessi, dove una usuale lavorazione meccanica risulterebbe troppo costosa e complicata da eseguire.
Oltre ai vantaggi economici, un altro vantaggio rilevante di questa tecnologia è la possibilità di creare oggetti con elementi alto fondenti come titanio e tungsteno. Per quanto riguarda le caratteristiche dei prototipi, sia in polimero sia in metallo ottenuti mediante Sls, essi hanno ottime finiture superficiali e ottime proprietà meccaniche. Inoltre, non si hanno più i problemi di sostegno pezzo come nelle tecnologie Sla e Fdm, infatti la polvere non fusa/non sinterizzata funge da sostegno del prototipo in costruzione.
Da sottolineare anche il largo uso di questo macchinario per produrre anime in sabbia per il R.T. (cfr.§1.0).
Uno dei pochi svantaggi di questa tecnologia è che il pezzo finito esce dal macchinario ricoperto da una polvere molto compatta, di metallo o polimero. La maggior parte della polvere la si rimuove mediante raschietti oppure con piani vibranti che ne facilitano il distaccamento, per pulire invece le superfici, le quali possono essere molto articolate, si prosegue con un processo di sabbiatura (ovviamente nell'ordine di alcuni bar di pressione).
Un ultimo svantaggio che si può attribuire a questa tecnologia di prototipazione è il costo del macchinario stesso. Solitamente ogni macchinario a tecnologia Sls è realizzato per lavorare con un determinato tipo di polvere (polimeriche,metalliche o ceramico). Per quanto riguarda le polveri esse sono difficili da produrre (almeno per quanto riguarda quelle metalliche e ceramico) e il loro costo dipende fortemente della dimensione media dei grani.

2.5 Polyjet

Il processo Polyjet si basa sullo stesso principiò di funzionamento di una stampante a getto d'inchiostro, solamente che qui, al posto dell'inchiostro, viene utilizzato un polimero fotoindurente con annesse lampade UV.

Il prototipo in costruzione è sostenuto da una matrice di cera o di gel molto viscoso, creata in contemporanea con il prototipo. Esso è sempre un processo che avviene per strati: il fotopolimero viene spruzzato, potenti lampade UV al bordo dell'ugello iniziano a polimerizzarlo, il fotopolimero si deposita sul pezzo e conclude la reticolazione (le micro particelle di fotopolimero durante il volo tendono a raggrupparsi a causa della reticolazione, riducendo la risoluzione).

Rispetto alla tecnologia Sla la polimerizzazione è completa, quindi non richiede un trattamento in una camera ultravioletta a fine processo. Se al fotopolimero aggiungiamo un colorante, è possibile ottenere prototipi con svariate tonalità di colore.

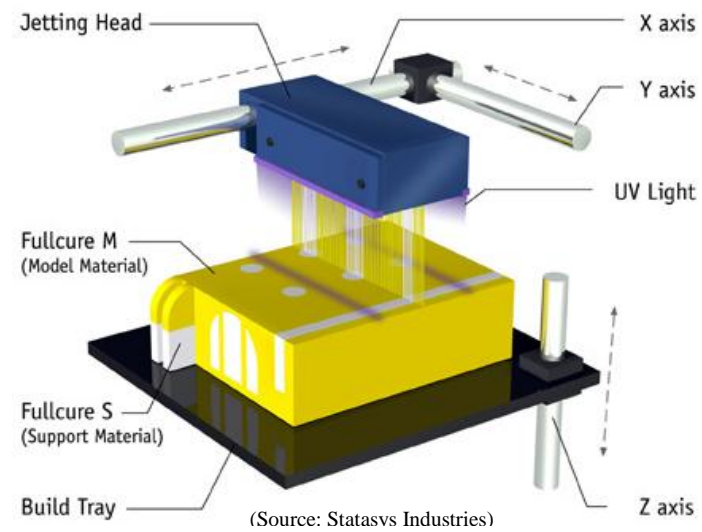
Per quanto riguarda la precisione di questa macchina abbiamo due dati da considerare: il primo è costituito dall'errore sul posizionamento della testina di stampa che si aggira sempre intorno ai 20÷30μm, mentre, per quanto riguarda l'eiezione di fotopolimero, si quantifica la sua "risoluzione di stampa" come fosse una nomale stampante a getto di inchiostro, cioè in *dpi* ovvero "drop per inch", con valori attorno ai 200 dpi per assi X e Y e con valori di 1270dpi per l'asse Z.

(Source: MCAD 3D Printing)

Figura1
Una tipica analisi fem stampata in 3D, permette di semplificare verifiche concettuali e correzioni del modello.

2.5.1 Gestione e movimentazione assi

Per quanto riguarda la movimentazione, essa funziona esattamente come quella utilizzata nella tecnologia Fdm (si intende quella di seconda configurazione a 3). Abbiamo sempre il controllo degli assi X, Y e Z dove X e Y sono gestiti dalla testina porta ugelli, mentre l'asse Z è gestito dal piano porta pezzo (vedi immagine seguente).

(Source: Stratasys Industries)

2.5.2 Microgetti e velocità

La tecnologia dei microgetti è stata largamente migliorata per il mercato della stampante inkjet.
Ci sono due differenti configurazioni per quanto riguarda la modalità con cui viene espulso il fotopolimero. La prima modalità è chiamata *Bubble-Jet* e consiste in una resistenza sommersa dal fotopolimero: essa viene riscaldata fino ad un centinaio di gradi in pochi millisecondi generando intorno a sé una bolla di vapore la cui pressione fa espellere all'ugello una micro goccia di fotopolimero; questa tecnologia fu sviluppata e migliorata da Hp e Canon per le comuni stampanti da ufficio. La seconda modalità è chiamata *Piezo-electtrica* e prevede, appunto, l'uso di un cristallo posto all'interno dei condotti che portano fotopolimero all'ugello; una volta che il cristallo riceve una carica elettrica, esso si contrae spingendo il fotopolimero.
Dato che queste due configurazioni eiettano inchiostro solo quando richiesto, esse sono note anche con il nome di "Drop on demand". Va sottolineato che la prima modalità, la Bubble-Jet, non è molto usata nelle stampanti 3D a tecnologia Polyjet, dato che la resistenza, oltre a creare la bolla di vapore, va a riscaldare il fotopolimero stesso. Molti fotopolimeri ifatti non possono eccedere oltre ad una certa temperatura, altrimenti si andrebbe ad alterare la natura del polimero stesso.
La velocità di una stampante 3D Polyjet è notevole, anche se inferiore sicuramente ad una stampante a tecnologia 3DP, e sicuramente maggiore rispetto ad una tecnologia Fdm. I fotopolimeri utilizzati in questa tecnologia devono avere basse viscosità in modo che la loro eiezione possa avvenire con facilità e continuità.
Di seguito sono riportate alcuni fotopolimeri utilizzati per la tecnologia Polyjet:

Polimero	UTS (MPa)	Young's modulus (GPa)
FC 700	42.3	2
FC800	49÷55	2.5÷2.7
FC900	55÷57	2÷6

2.5.3 Vantaggi e svantaggi

La stampante 3D a tecnologia Polyjet è molto apprezzata per la possibilità di ottenere oggetti 3D aventi una grande varietà di colori, ecco perché queste stampanti sono largamente utilizzate solo nell'ambito della creazione di modelli concettuali e modelli per la validazione. Questo è dovuto al fatto che la resistenza ad eventuali test funzionali è molto limitata, e soprattutto l'esposizione al sole di questi fotopolimeri provoca un veloce deterioramento della struttura polimerica portando ad una irreversibile depolimerizzazione.
Uno dei vantaggi di questa tecnologia consiste proprio nella velocità con cui è in grado di realizzare i prototipi. Per quanto riguarda il prototipo uscente dalla macchina, esso ha bisogno di un lavaggio per rimuovere la cera o, eventualmente, il gel rigido che costituiscono le strutture di sostegno; se i sostegni sono fatti da cere si usano solitamente dei solventi che non intaccano ovviamente il polimero fotoreticolato, se invece per i sostegni si utilizza il gel, si può adoperare tranquillamente un getto d'acqua, essendo il gel idrosolubile.
Per aumentare ulteriormente la resistenza dei pezzi e la qualità della finitura superficiale si possono immergere i prototipi in bagni di resine o vernici che penetrando nelle cavità riempiono i pori superficiali.

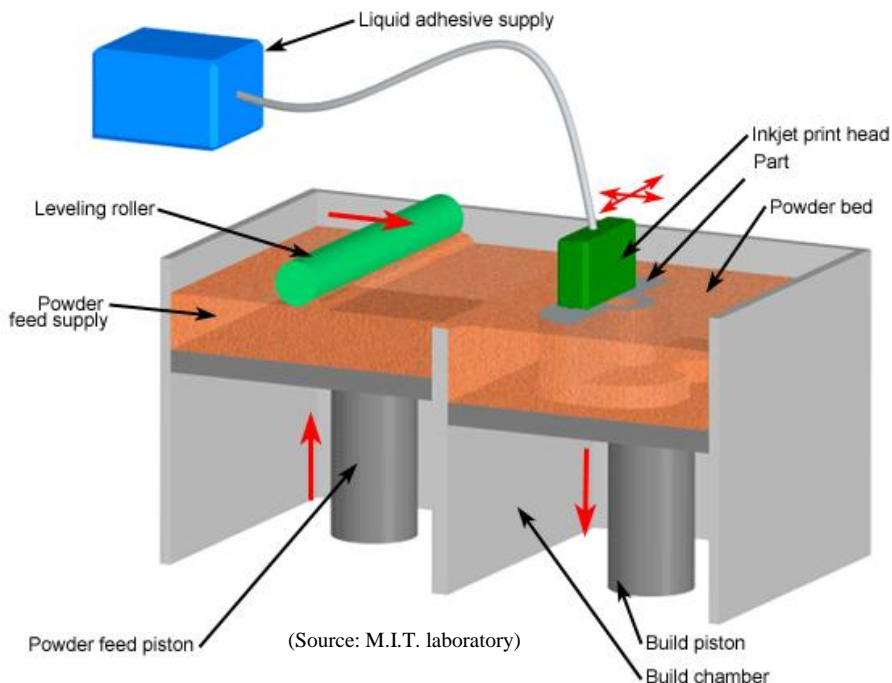
2.6 Three-dimensional printing (3DP)

Il progetto nasce da un brevetto del M.I.T. di Boston. Questa nuova tecnologia di prototipazione consiste di due fasi: nella prima viene stesa una polvere polimerica (ad esempio ABS, ma potrebbe anche essere una polvere di gesso, di ceramico o anche di amido); successivamente un ugello spruzza del legente (colla) nei punti desiderati e fissa tale polvere creando un prototipo. Il prodotto finito sarà quindi costituito da un vero e proprio composito particellare a matrice polimerica.
Anche per questa tecnologia di prototipazione è possibile creare una vasta gamma di colori.
Le precisioni del R.P. a tecnologia 3DP sono: 9µm su 20cm di spostamento sull'asse Z e 115µm su 15cm di spostamento per gli assi X e Y. Anche qui, trattandosi di una eiezione, abbiamo una

risoluzione di spruzzatura molto più precisa (infatti non abbiamo lampade UV che reticolano il polimero dall'ugello al pezzo, cfr§2.5.2).
Ugualmente, come per la tecnologia Polyjet, dobbiamo parlare anche della risoluzione di stampa essendo sempre un processo a eiezione; i valori tipici si aggirano intorno a 300dpi per assi X e Y mentre per l'asse Z intorno ai 1300dpi con un numero di getti che si aggira intorno alle 1500 unità.

2.6.1 Gestione e movimentazione assi

Rispetto ad una tecnologia Sls c'è solo una sostanziale differenza: la solidificazione non avviene per fusione/sinterizzazione ma per apporto di legante liquido. Esso è comunemente un polimero, più precisamente una resina epossidica ad alta velocità di reticolazione.
Anche in questo caso abbiamo un piano portapezzo che durante la creazione del prototipo si sposta verso il basso, mentre il piano alimentatore si sposta della stessa quantità ma verso l'alto. Un rullo controrotante provvede ad apportare e livellare un nuovo strato di polvere fornito appunto dal piano alimentatore. Inizia quindi il processo di eiezione del legante, che ricomincia una volta ultimato il processo.
Il meccanismo di movimentazione coincide perfettamente con quello di una stampante 3D a tecnologia Polyjet (cfr.§2.5).

(Source: M.I.T. laboratory)

2.6.2 Microgetti e velocità

Per quanto riguarda la tecnologia di spruzzatura utilizzata siamo sempre nell'ambito "drop on demand", ovviamente con l'utilizzo di sistemi piezo-ekettrici e non a bubble-jet. Nei laboratori del M.I.T. è stato rilevato come una resina eposidica spruzzata calda impieghi più tempo ad asciugarsi che non una resina spruzzata a temperatura ambiente (la solubilità del solvente presente nella resina è più alta alle alte temperature, quindi il solvente tende a non evaporare e quindi la resina non reticola).
Per quanto riguarda le velocità di prototipazione esse sono le più alte in assoluto rispetto a qualsiasi altra tecnologia esistente.
I materiali che solitamente costituiscono le polveri possono essere dei più svariati, dai semplici polimeri fino ai metalli leggeri a ceramici. Inoltre per una stampa Eco-friendly si utilizza anche l'amido di mais o il PLA (in questo caso il PLA è in polvere, nella tecnologia Fdm era in filo). Per quanto riguarda i leganti generalmente si tratta di polimeri termoindurenti (resine epossidiche).
Riguardo le velocità di produzione esse si esprimono in mm/h ma solo rispetto all'asse Z, dando quindi un'idea concreta del tempo che un oggetto impiega per "crescere in altezza". Valori tipici si aggirano intorno a 5÷15mm/h. Lo strato di polvere depositato può variare il suo spessore da un minimo di 80µm (stampa extra precisa, le velocità si aggirano intorno ai 5mm/h) ad un massimo di 150µm. per

2.6.3 Vantaggi e svantaggi

Grazie a questa tecnologia si riescono ad ottenere dettagli accuratissimi e finiture superficiali notevoli. Le velocità di prototipazione si aggirano attorno a 500mm/s (velocità di spostamento testina spruzzatrice), quindi i tempi di realizzazione prototipo sono molto ridotti. Si deve però considerare che a fine processo di prototipazione i pezzi generati devono subire un vero e proprio trattamento termico per aumentare considerevolmente le proprietà di resistenza del pezzo prototipato (avviene una vera e propria sinterizzazione). Le tempistiche di questo trattamento dipendono delle geometrie del prototipo e dalla polvere utilizzata. Nonostante ciò, non si raggiungono mai alte proprietà di resistenza come per i prototipi prodotti da tecnologia Sls o Sla.
Volendo ulteriormente aumentare la resistenza dei prototipi, prima del trattamento termico si può procedere con delle infiltrazioni nel modello (che ha comunque una certa porosità) di un ulteriore quantitativo di legante. Ultimamente questa tecnica di prototipazione viene utilizzata al posto della M.I.M. o "metal injection molding". Infatti, il processo di iniezione, all’interno di una forma, della polvere di metallo miscelata a polimero (che funge da legante una volta raffreddato) è interamente sostituita dalla tecnologia 3DP; i passi successivi del processo, invece, come l'evaporazione del legante e la sinterizzazione del pezzo, rimangono inalterate.

2.7 Laminate object manufacturing (Lom)

Questa tecnologia di prototipazione rapida fu ideata nel 1991 da Michael Feygin. Tale processo di prototipazione prevede l'utilizzo di un foglio di carta nel quale la parte inferiore è impregnata con un legante che si attiva con il calore, essa può essere a base di etil-vinil-acetato oppure a base poliuretanica reattiva. Il foglio viene steso lungo un piano, e un rullo termoriscaldato viene fatto passare sopra al foglio in modo che esso si incolli allo strato sottostante; poi, un laser ritaglia sul foglio il contorno del prototipo (questo contorno è direttamente determinato nella sequenza di slicing); oltre a questo, fuori dai contorni il laser ritaglia il rettangolo principale che conterrà il pezzo e una serie di quadri a contorno fisso i quali permetteranno di rimuovere il materiale in eccesso e scoprire il nostro prototipo. Il processo procede in modo ciclico.

2.7.1 Gestione e movimentazione assi

La movimentazione è gestita esattamente come una macchina a tecnologia Fdm (prima configurazione, cfr.§2.2.1), solamente che la torretta non trasporta alcun estrusore bensì un sistema di specchi e un condotto atto a focalizzare il laser. Sarebbe infatti sconveniente e complicato movimentare tutto l'apparato che genera il fascio laser, perciò utilizzando un sistema di specchi fissi (come inclinazione e non come posizione) è possibile spostare solo il fascio laser. Il laser si muove sul piano XY mentre lo spostamento in Z (verso il basso) è affidato al piano portapezzo.

(Source: Cubic Tecnology)

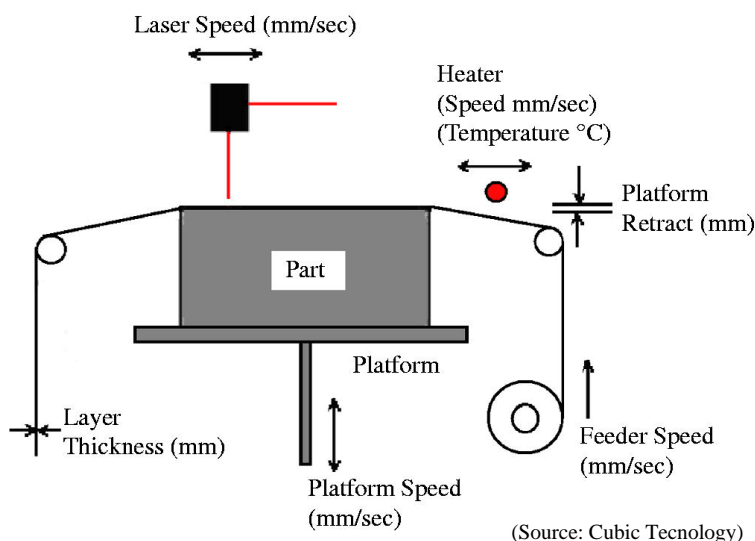



Figura: Schema di funzionamento di una macchina a tecnologia Lom. Notare l'apparato per l'apporto di nuova carta. Il laser è sempre perpendicolare al piano porta pezzo.

In aggiunta al sistema di movimentazione del laser abbiamo quello per l'apporto di nuova carta da termo-incollare. Il suo funzionamento è molto semplice: una ruota in acciaio collegata ad un encoder si appoggia al rullo di alimentazione; finito il processo di taglio, il rullo per

l'avvolgimento della carta non termo-incollata inizia a prelevare nuova carta dal rullo di alimentazione; l'encoder conterà la lunghezza del foglio srotolato e bloccherà il processo quando tutta la superficie in lavorazione (tutto il piano portapezzo) verrà ricoperta (è una lunghezza che viene settata come default).

2.7.2 Materiale e velocità di taglio

La velocità di lavorazione dipende in gran parte dalla velocità di spostamento del laser che deve sempre essere ortogonale al piano di lavoro, e questo rende la movimentazione più lunga. Inoltre, la velocità di lavorazione dipende anche dallo spessore della carta utilizzata: per una carta da 200μm le velocità di taglio si aggirano attorno ai 100÷130mm/s, mentre per una carta da 100μm si aggirano attorno ai 180mm/s. Per quanto riguarda la velocità del foglio di carta siamo intorno ai 120mm/s. Il rullo riscaldante (che è regolato e mantenuto costante alla temperatura di 180°C) ha una velocità di 140÷150μm. Riassumendo:

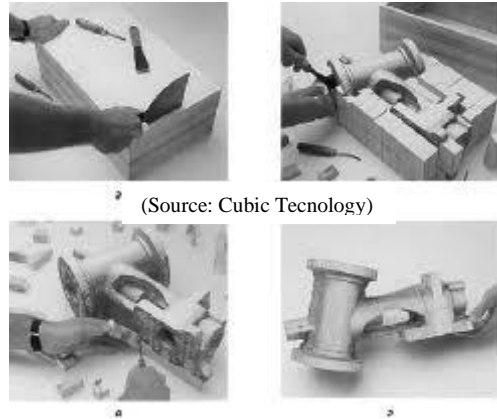
Carta per LOM	**Spessore**	**Larghezza nastro**	**Temperatura attivazione collante**	**Massima velocità di taglio**
LPH 042 140	106.7 μm	14 (in)	75°C	203mm/s
LPH 042 190	106.7 μm	19 (in)	75°C	203mm/s
LPH 042 240	106.7 μm	24 (in)	75°C	203mm/s
LPH 042 290	106.7 μm	29 (in)	75°C	203mm/s
LPH 080 140	202.3 μm	14 (in)	75°C	170mm/s
LPH 080 290	202.3 μm	29 (in)	75°C	170mm/s
LPS 038 135	96.8 μm	13.5 (in)	150°C	50mm/s
LPS 038 270	96.8 μm	27 (in)	150°C	50mm/s

2.7.3 Vantaggi e svantaggi

La tecnologia Lom non gode di molti vantaggi, per questo è stata pressoché abbandonata negli ultimi anni. Nonostante ciò la Lom gode di alcuni vantaggi: primo fra tutti l'assenza di distorsioni nei pezzi finiti causate dalle tensioni interne (nelle tecnologie Fdm, Sls e Sla invece sono presenti); inoltre, i volumi di stampa sono notevoli e la resistenza dei prototipi ha direzioni preferenziali, ma nel complesso accettabili in tutte le direzioni.
Il prototipo uscente è contenuto in un parallelepipedo formato da fogli di carta termo-incollati. La rimozione risulta difficoltosa e laboriosa nonostante la famosa struttura a cubi del volume che

contiene il pezzo. Come si nota dall'immagine, i cubetti vengono staccati mediante l'ausilio di spatole e scalpelli, processo molto delicato e laborioso.

Altro svantaggio di questa tecnologia, qualunque sia la dimensione del pezzo da prototipare, si ha una grande inefficienza per quanto riguarda la quantità di materiale realmente utilizzata per il prototipo e quella utilizzato lungo tutto il processo di creazione. Nella figura qui sopra di nota come circa il 60÷70% del materiale utilizzato sia scarto e soprattutto irrecuperabile.

(Source: Cubic Tecnology)

2.8 Film transfer imaging (Fti)

Questa tecnica è stata recentemente sviluppata dall'azienda 3D System e nasce da un esigenza di tipo economica (realizzare una stampante 3D ad altissima precisione limitando i costi). I progettisti della 3D System hanno pensato ad un metodo alternativo: usare sempre un fotopolimero liquido, che non è più spruzzato direttamente sul pezzo in sostruzione, ma viene depositato su di un piano trasparente ai raggi UV (nella figura 1 "material tray"). Successivamente il piano portapezzo viene messo in contatto con il fotopolimero, figura 2, e viene polimerizzato il tutto. Il generatore UV altro non è che un proiettore, infatti esso fotopolimerizza un'immagine che corrisponde alla sezione da creare. Il piano portapezzo si alza e un raschietto ("scraper", vedi figura 3) pulisce il piano e rideposita un altro strato di fotopolimero liquido. Il piano portapezzo si abbassa di nuovo fino al contatto con lo strato liquido, successivamente viene fotopolimerizzato il tutto proiettando l'immagine della sezione successiva (quelle ottenute dallo slicing). Il processo si ripete in modo ciclico. Lo spessore dello strato depositato rispetto a qualsiasi altra tecnologia riesce a raggiungere valori bassissimi nell'ordine di 20μm.

2.8.1 Gestione e movimentazione assi

Rispetto alle altre tecnologie la Fti gode di una notevole semplicità per quanto riguarda i meccanismi di movimentazione, basti pensare che non si usano più tre assi per la movimentazione ma solo due: l'asse X per stendere il polimero mediante una lama (comunemente chiamata "spalmatrice") e l'asse Z per alzare e abbassare il piano porta pezzo. Con l'utilizzo di un proiettore a raggi UV si ottengono immagini molto precise e dettagliate. Solitamente per la movimentazione dell'asse Z si utilizza una barra trapezoidale con annessa chiocciola, inoltre, dovendo effettuare movimentazione molto precise, si preferisce l'utilizzo di motori passo-passo con annesso encoder.

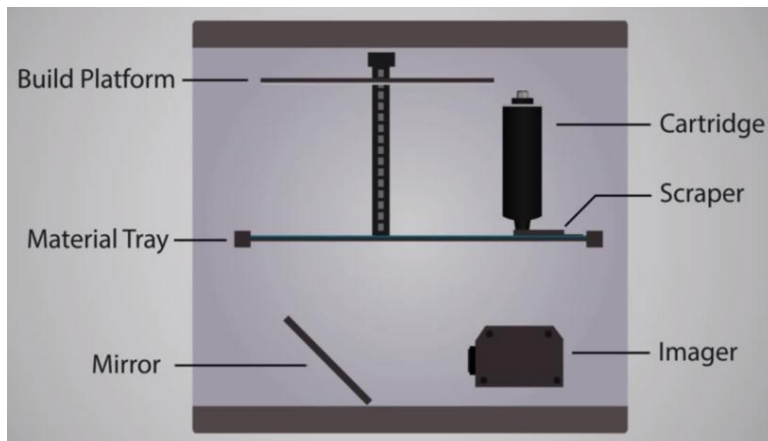



Figura 1

Fase di spalmatura.

Piano portapezzo (build platform); vassoio per il fotopolimero (material tray); raschietto e spalmatrice (scraper), Proiettore UV (imager) e sistema a specchio (mirror).

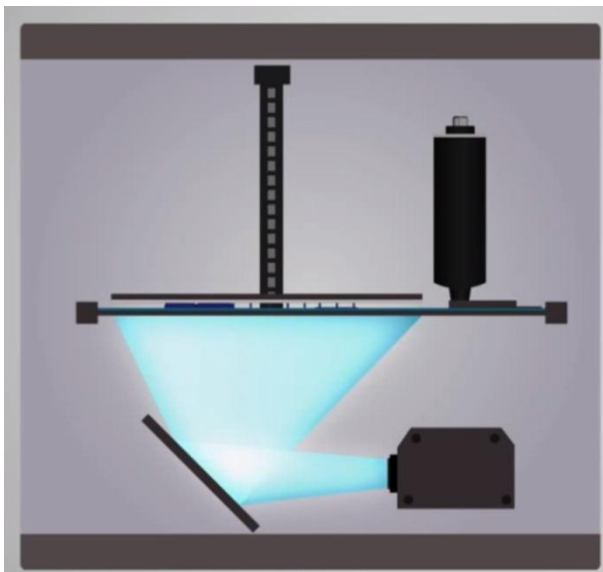



Figura 2

Fase di foto polimerizzazione.

Il piano portapezzo è posto in contatto con il liquido e il proiettore solidifica il fotopolimero al pezzo in costruzione (trasferisce la sezione, ecco perché "transfer imaging").

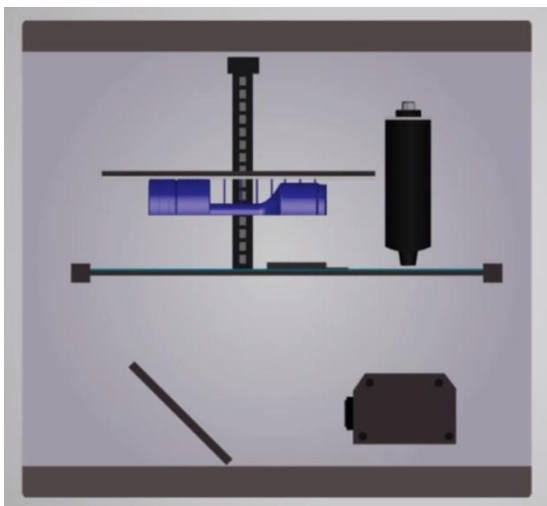



Figura 3: Fase di raschiatura vassoio (pulizia) e stesura nuovo strato (spalmatura) di fotopolimero.

Source: 3D System

2.8.2 Fotopolimerizzazione e spalmatura

Per quanto riguarda la polimerizzazione essa avviene esattamente come nella tecnologia Sla o Polyjet, cambia però il principio di base: non si controlla più il polimero (come la spruzzatura nel

processo Polyjet) ma la luce UV, ed essa non è concentrata in un punto (come nelle tecnologia Sla) ma è un'intera immagine della sezione.
Il processo procede per strati garantendo un perfetto spessore uniforme e di dimensioni molto contenute. La planarità della sezione è garantita e mantenuta lungo tutto il processo (in un processo per Fdm ad esempiò non è affatto garantita).
La stessa fotopolimerizzazione avviene in modo completo, non dovendo compiere alcun ulteriore trattamento del prototipo in camere UV, e garantendo al pezzo buone proprietà di resistenza.
Uno svantaggio, comune anche alle tecnologie Sla e Sls, è l'incapacità di produrre prototipi colorati, di conseguenza questi saranno mono cromatici e il loro colore dipenderà dal fotopolimero utilizzato.
Lo svantaggio maggiore che accompagna tutte le resine fotoindurenti è la loro fragilità dopo il processo di reticolazione e il loro veloce deterioramento a contatto con la luce solare.
Di seguito riporto i fotopolimeri prodotti dalla 3D System per questa tecnologia di produzione. Notiamo subito che le forcelle dei valori delle UTS sono molto ampie ed il motivo è semplice: il parametro UTS dipende direttamente dal grado di polimerizzazione del pezzo, che a sua volta dipende dalla velocità di prototipazione. Si può di fatto affermare che: più velocità di prototipazione (mm/h come crescita pezzo),quindi meno reticolazione danno un basso UTS.

Materiale	UTS	Colore
VisilJet FTI 10	5÷1	rosso/blu/giallo/bianco
VisilJet FTI 20	13÷8	Nero/grigio/verde
VisilJet FTI 45	29÷15	semitrasparente

2.8.3 Vantaggi e svantaggi

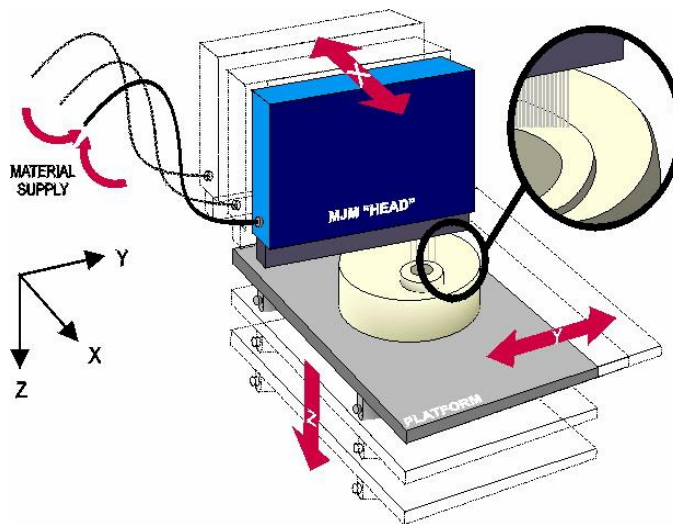
Tale tecnologia gode di una semplicità unica nel suo genere: questo comporta un costo d'acquisto ridotto rispetto alle altre tecnologie, garantendo comunque ottime finiture superficiali e ottime tolleranze dimensionali.
La velocità di prototipazione si aggira attorno ai 10÷15 mm/h (sempre rispetto all'asse Z, esprime la "crescita 3D del pezzo"); essa dipende fortemente dalla velocità con cui il fotopolimero reticola e il suo valore compete con quello della tecnologia 3DP che, come sappiamo, vanta il valore della velocità di prototipazione più alto (cfr.§2.6.2). Ovviamente, la casa produttrice mette a disposizione vari tipi di fotopolimero; in base alle necessità, infatti, si possono avere fotopolimeri per prototipi destinati a test funzionali, prototipi per *mok up* e prototipi per scopi puramente concettuali. Va evidenziato che questi particolari polimeri hanno un costo rilevante rendendo meno conveniente la prototipazione (in termini di €/pz); qui, però, subentra il vantaggio della

velocità con cui essi vengono realizzati, quindi i costi di funzionamento del macchinario (€/h) si abbassano notevolmente rendendo competitiva anche questa tecnologia di prototipazione.

2.9 Multi jet modeling (Mjm)

La tecnologia di prototipazione Multi Jet Modeling nasce per soddisfare le già citate esigenze di "rapid tooling", infatti la Mjm non produce reali prototipi funzionali o concettuali, ma veri e propri modelli usati in ambito fonderia.
Il processo di creazione del modello avviene sempre per strati ed utilizza una cera che viene fusa a circa 80°C (le temperature esatte dipendono dalle varie cere in commercio). Raggiunta questa temperatura, la cera, oltre ad essere liquida, ha una viscosità bassa, caratteristica che le permette di essere spruzzata mediante il processo "Bubble Jet" (v.§2.5.2). Come detto in precedenza, questa tecnologia è ampiamente adoperata per creare "expandable pattern" ovvero modelli a perdere, molto usati nell' "Investment casting" noti anche come processi a cera persa.

2.9.1 Gestione e movimentazione assi

Per quanto riguarda l'apparato movimentazione esso consiste nel solito piano portapezzo, al quale sono affidati oltre che alla consueta movimentazione rispetto all'asse Z anche la movimentazione in Y. Alla torretta porta-ugelli è affidata solo la movimentazione lungo l'asse X; tutto ciò è dovuto ad un problema di inerzie: infatti, la torretta che contiene l'apparato che liquefa e spruzza la cera oltre ad avere un determinato ingombro ha anche un determinato peso, limitarne i movimenti è essenziale per mantenere una buona precisione ed evitare il sovradimensionamento della struttura portante. Solitamente le testine ospitano 530 ugelli ma si possono avere, per ottenere modelli super precisi per "Plaster Mold Casting", testine che superano facilmente le migliaia di ugelli. Durante questo processo è essenziale il controllo di temperatura dell'ambiente di stampa, onde evitare ritiri da solidificazione che andrebbero a deformare il pezzo in creazione.
Nella figura la camera di stampa è stata omessa per semplificare la visione dei componenti.

(Source: Zcorp)

2.9.2 Vantaggi e svantaggi

La tecnologia Mjm gode di discrete velocità di prototipazione, paragonabili al 3DP, garantendo a discapito della resistenza ottime finiture superficiali (la cera tende marcatamente a diminuire l'energia superficiale inglobando le particelle spruzzate e creando così superfici continue e non rugose).
Conseguentemente questi modelli in cera vengono immersi ripetutamente in bagni di gesso o di sabbia da fonderia mista a leganti fino a quando lo strato è sufficientemente spesso per resistere ad una colata; poi, vengono posti in un forno sia per asciugare il gesso o legare la sabbia, sia per far liquefare ed evaporare la cera in modo da liberare tutte le cavità in cui andrà colato il metallo.
Particolare attenzione viene dedicata alla formulazione di tutte le cere: esse devono poter liquefarsi ed evaporare senza lasciare traccia nella forma che esse stesse hanno generato.

CAPITOLO 3
RIPARAZIONE E REVISIONE LOM HELISYS 1015

3.0 Introduzione e storia della tecnologia Lom

L'azienda Helisys Inc. fu fondata agli inizi degli anni Novanta da Michael Feygin, in California, e la tecnologia di prototipazione Lom fu proprio una sua invenzione.
Tale azienda crebbe ad un buon ritmo fino a metà degli anni Novanta grazie all'idea innovativa di poter realizzare, in breve tempo, prototipi concettuali servendosi di macchinari relativamente poco costosi (nell'ordine dei 100000$ nel 1992) e mediante l'utilizzo di materiali economici.
La 3D System infatti, già a fine degli anni Ottanta, aveva brevettato e prodotto la SLA1 (utilizzava la tecnologia Sla) ma il costo di questo macchinario e dei materiali usati (fotopolimeri) lo rendeva inaccessibile a molte realtà industriali. Tutto sembrava favorire la tecnologia Lom, ma ben presto ci si rese conto dei limiti insormontabili della sua tecnologia (cfr.§2.7.3); sta di fatto che, alla fine degli anni Novanta, l'azienda produttrice si trovava già sull'orlo del fallimento e fu acquistata dalla Cubic Technologies. Nonostante ciò, la tecnologia Lom è considerata una pietra miliare della storia del "Rapid Prototyping".
L'Università di Padova, circa trent'anni fa, precisamente il 20 settembre 1995 decise di acquistare una macchina della Helisys Inc, una Lom Helisys 1015.
Era il terzo modello prodotto dall'azienda californiana: prima infatti, furono prodotte la Lom Helisys 2030 e la 2030Plus. La macchina venne successivamente spostata all'Università di Vicenza, dove si trova tuttora.

Questo capitolo nasceva con l'intento di documentare e descrivere il processo di revisione e settaggio per poter rimettere in funzione la Lom Helisys 1015. Purtroppo, a causa di alcuni problemi, questo non è stato possibile. Di seguito quindi, troverete un resoconto di tutte le operazioni fatte e delle procedure per il settaggio del macchinario.

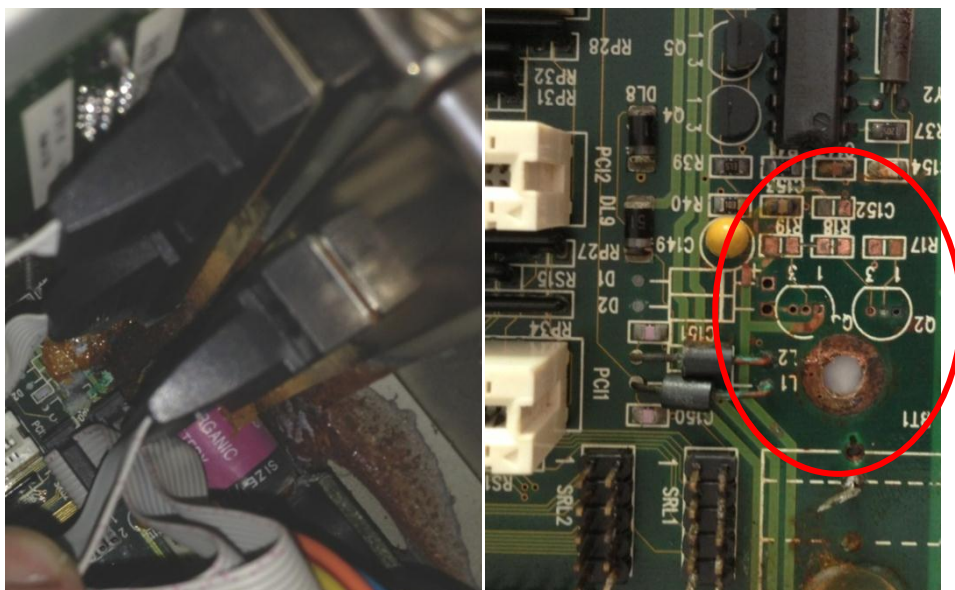
3.1 Specifiche tecniche generali delle Lom Helisys 1015

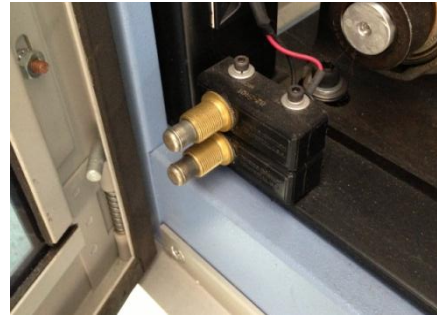
- La Helisys 1015 ha un volume produttivo dato da: (381 mm lungo l'asse X) x (254 mm lungo l'asse Y) x (355 mm lungo l'asse Z).

- L'errore sul posizionamento del laser e del piano portapezzo va da un valore di 2 decimi di millimetro fino ad un massimo di 3.5 decimi di millimetro.
- Il formato di input deve essere .STL, il programma utilizzato per il funzionamento del macchinario si chiama "Lom Slicing".
- Alimentazione 110V, 60Hz , 20 A.
- Diametro dello spot laser 0.35mm con ampiezza d'onda compresa tra 10.5 e 10.7 micron.
- Computer con architettura 486, Pentium Socket 5.

3.2 Analisi problemi

Dopo una prima analisi di tutte le componenti meccaniche della macchina ci siamo soffermati a revisionare la componentistica di controllo e di gestione, che comprende un computer con architettura 486, 33MHz e 16 MB di ram. Quest'ultimo oltre ad effettuare lo "slicing", controlla l'intero processo di prototipazione.

Abbiamo quindi analizzato la scheda madre (una Socket 5) dove solitamente è montata anche la batteria tampone al Ni-Cd. Molto spesso queste batterie tampone hanno una vita massima di dieci/dodici anni dopo i quali iniziano a rilasciare l'elettrolita alcalino (che è molto corrosivo); la loro vita, inoltre, si riduce sensibilmente se esse rimangono inutilizzate collegate ad un circuito. Qui abbiamo riscontrato il primo problema: si notava chiaramente che la batteria tampone in completa ossidazione aveva rilasciato, su tutta la porzione di scheda madre adiacente, l'elettrolita alcalino, il quale, a sua volta, aveva ossidato e letteralmente distrutto tutti i componenti elettrici sottostanti. Nella prima foto la batteria tampone è in viola; nella seconda foto, una volta rimossi la batteria e tutto l'ossido, si nota la mancanza dei componenti erosi.

Non riuscendo a riconoscere i componenti corrosi (il che rende impossibile la loro sostituzione), abbiamo optato per la sostituzione dell'intera scheda madre.
Sorge qui il secondo problema: una scheda madre simile, sempre con architettura 486, avrebbe sicuramente funzionato, ma andavano reinstallate tutte le periferiche (schede di controllo) mediante i driver. Quest'ultimi, a differenza del sistema operativo, non sono stati rilasciati insieme al manuale di istruzioni del macchinario.
Abbiamo provato a risolvere il problema cercando i driver in Internet, ma la ricerca non dava risultati. Quindi abbiamo contattato direttamente il Sig. Michael Feygin (il fondatore della Helisys Inc.) tramite e-mail chiedendo informazione per i driver delle periferiche. Il Sig. Feygin rispose dicendo che solo una parte dei driver era disponibile al costo di circa 1500$. Nessuno ci assicurava, però, che una volta acquistati i driver la macchina avrebbe sicuramente funzionato, senza contare sul fatto che con 1200$ si può acquistare tutto l'occorrente per costruire una stampante 3D a tecnologia Fdm (vedi capitolo seguente).
Nonostante ciò, il Professor Berti è riuscito a trovare una scheda madre compatibile alla nostra: una volta re-istallato tutte le componenti hardware abbiamo constatato che il sistema operativo funzionava perfettamente, ma le schede per il controllo della Helisys 1015 non venivano riconosciute (come detto in precedenza mancavano tutti i driver che interfacciano scheda madre alle schede di controllo).
L'unica speranza rimasta era quella di trovare una scheda madre che fosse perfettamente identica a quella originale, in modo che non ci fosse bisogno dell'utilizzo dei driver. Dopo un'attenta ricerca abbiamo contattato un sito tedesco *Amoretro.de* che si occupa di rifornire pezzi di ricambio per i cimeli dell'informatica; tuttavia, anche loro hanno confermato che trovare una scheda madre identica fosse impossibile (sempre per il fatto che tutte le schede madri di quel modello facevano esattamente la stessa fine della nostra, corrose dall'elettrolita della batteria tampone). L'amministratore del sito, il Sig.Fabian Günther-Bortel, comunque volle sapere per quale motivo cercavamo un'altra scheda; espostogli il problema, gli mandammo le foto evidenziando il danno della batteria tampone. Il Sig. Fabian, ci disse che rispetto ad altri casi il nostro danno era contenuto e quindi conveniva tentare, per far funzionare la scheda, di cortocircuitare i pin di collegamento della batteria tampone in modo da garantire la continuità del circuito. Con un normalissimo saldatore a stagno e con un cavetto in rame effettuammo l'operazione. Riassemblato e ricollegato il tutto abbiamo messo in funzione il macchinario, tutto funzionava perfettamente. Avviato il programma LomSlice, però, il computer segnalava un errore di connessione alla scheda per la gestione dei motori posta dietro al macchinario. Subito abbiamo pensato che si trattasse di un problema al sistema di sicurezza del macchinario, infatti nel manuale era chiaramente specificato che il macchinario funzionava solo se il coperchio e le porte di accesso al vano movimentazione carta fossero completamente chiuse.

Abbiamo quindi controllato con un tester tutti gli swicht di sicurezza installati sulle porte (vedi foto a fianco) e ovviamente tutto funzionava alla perfezione. Il problema quindi, era nella scheda gestione dei motori (codice e nome: 408555 GALIL).

A questo punto abbiamo tentato di risolvere il problema modificando i valori di setup del macchinario dal programma LomSlice, ma ancora una volta il macchinario non rispondeva. Consapevoli di aver fatto tutto il possibile per ridar vita alla Lom Helisys 1015, abbiamo riassemblato i pannelli posteriori del macchinario (proteggevano dalla polvere tutto il cablaggio del macchinaro) e scollegato i cavi di alimentazione. Identificare ora se il problema sia realmente dovuto alla scheda GALIL oppure alla mancanza di comunicazione tra computer e macchinario è davvero complicato. Siamo giunti quindi ad una conclusione: anziché investire ancora tempo e denaro per la riparazione del macchinario, l'idea più sensata è quella di smantellarlo completamente e di recuperare tutto il materiale possibile. Di seguito elenchiamo i possibili componenti riutilizzabili:

- 3 encoder modello AmericanControl 332906 e annesse schede di controllo;
- 3 motori passo passo da 200step/giro e annessi driver di movimentazione;
- 2 barre trapezoidali da 70 cm con annesse chiocciole a ricircolo di sfere;
- un generatore laser da 25W a CO_2;
- sistema di specchi e tunnel focale;
- un sistema completo per l'aspirazione dei fumi;

Per chi invece volesse proseguire il *progetto di riparazione e settaggio*, qui di seguito troverà la in foto: tutto il cablaggio tra macchina e computer e alcune procedure di setup (allineamento e focalizzazione laser e regolazione rullo riscaldante).

3.3 Collegamenti computer - Helisys 1015

Come precedentemente scritto, la scheda madre del computer è un modello molto datato. Essa prevede ancora l'utilizzo degli slot ISA a 16 bit nelle quali sono alloggiate le schede di controllo. Le schede installate (vedi figura seguente) sulla scheda madre sono 6:

#1) scheda per il controllo e gestione del laser;

#2) scheda per la gestione del rullo riscaldante e la movimentazione dell'apparato carta;

#3) scheda modem per l'assistenza telefonica;

#4) scheda ethernet;

#5) scheda per il collegamento delle periferiche di memoria;

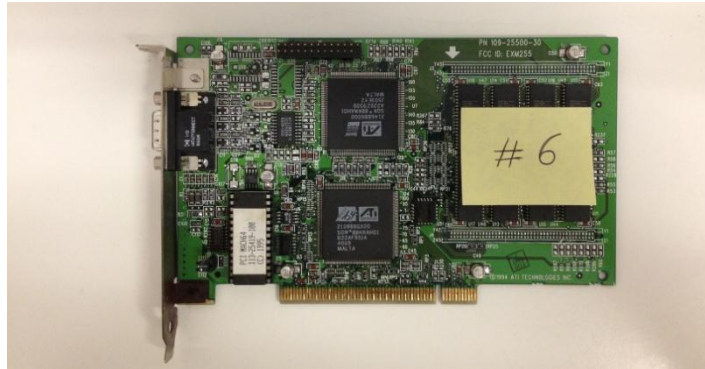
#6) scheda video.

1

2

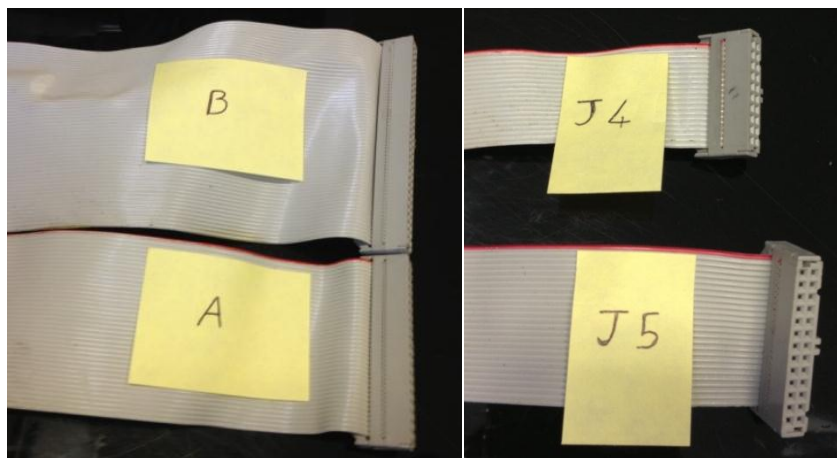
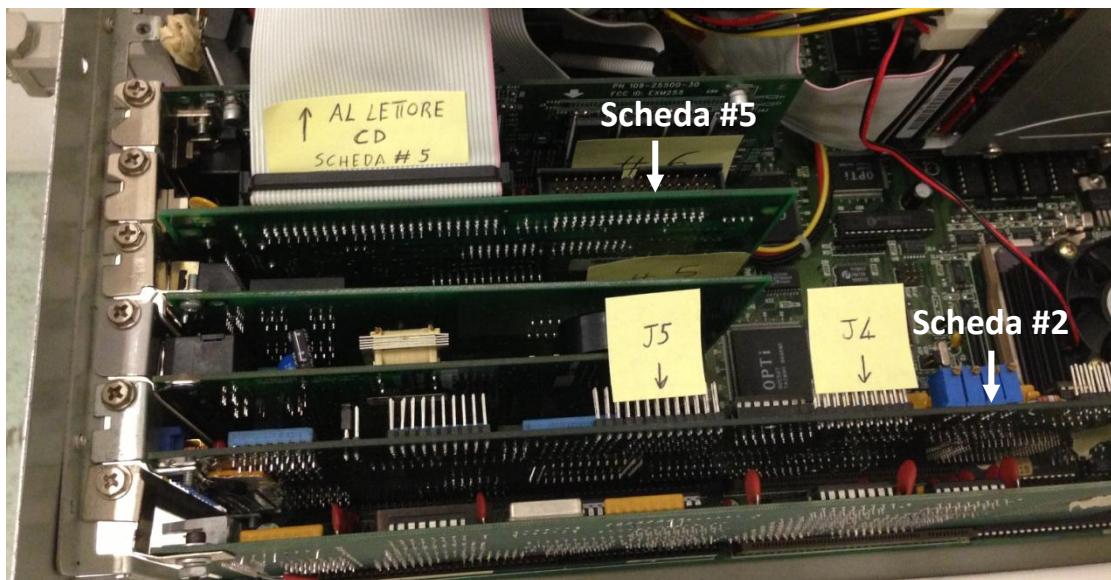
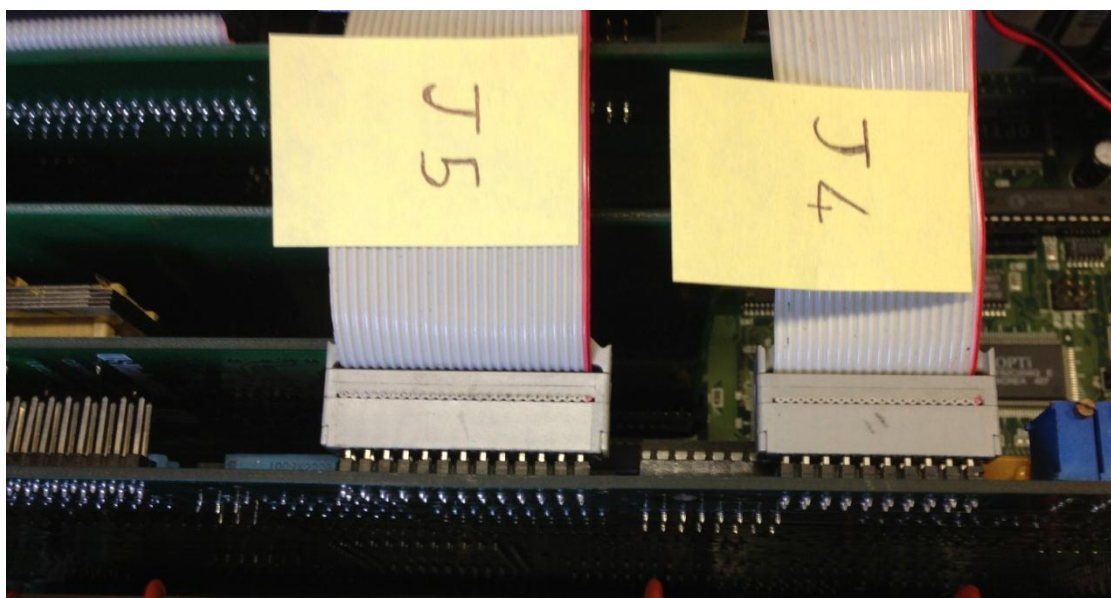
3

3Com
EtherLink III
4

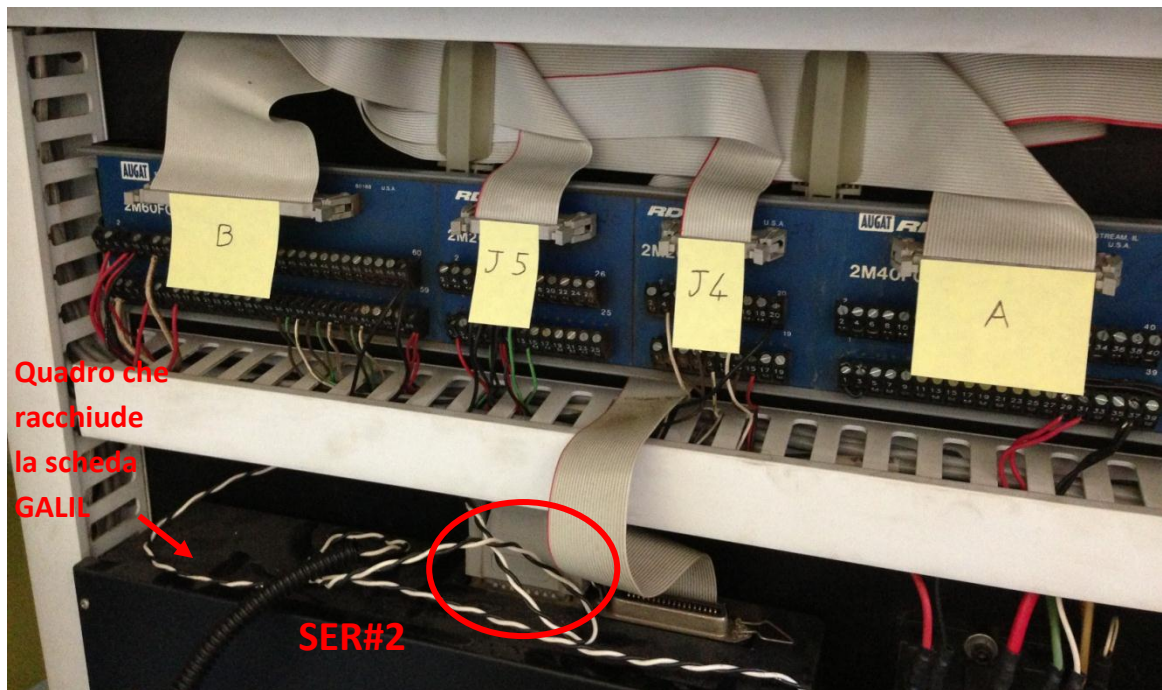
5

Per quanto riguarda la loro disposizione sulla scheda madre (si devono rispettare i vari indirizzi associati alle schede, quindi è fondamentale riporle nelle apposite porte ISA) fare affidamento alla figura seguente; i numeri riposti sulle varie porte corrispondono al numero delle scheda da inserire:

Invece, per il collegamento di tutti i dispositivi di input ed output, cioè i collegamenti tra macchina e computer (vedi immagine seguente) abbiamo:

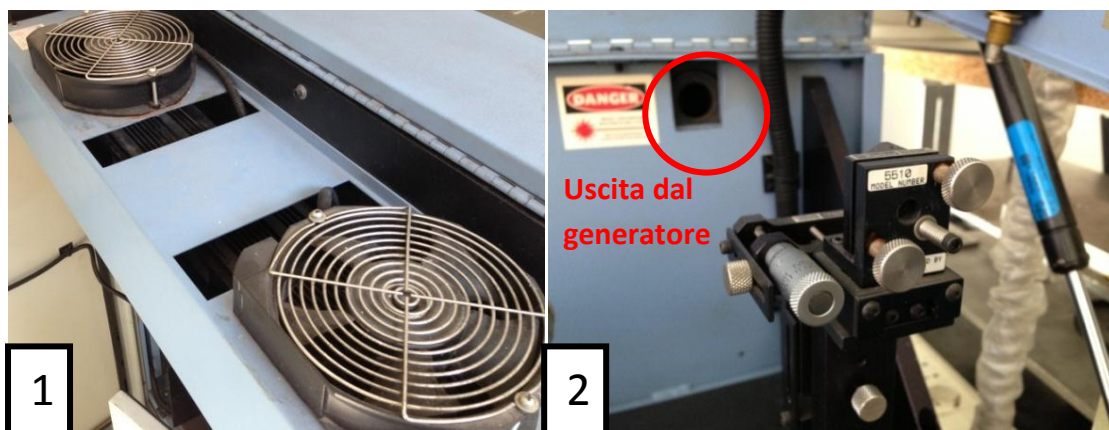
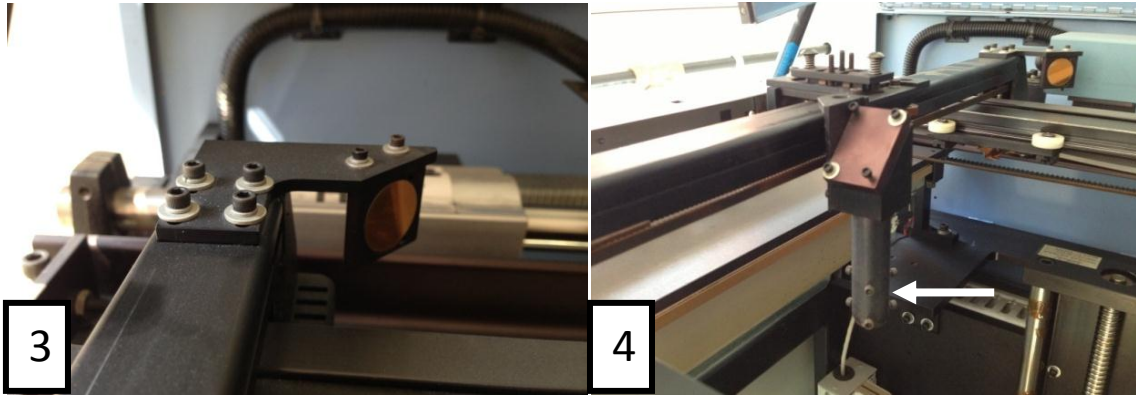
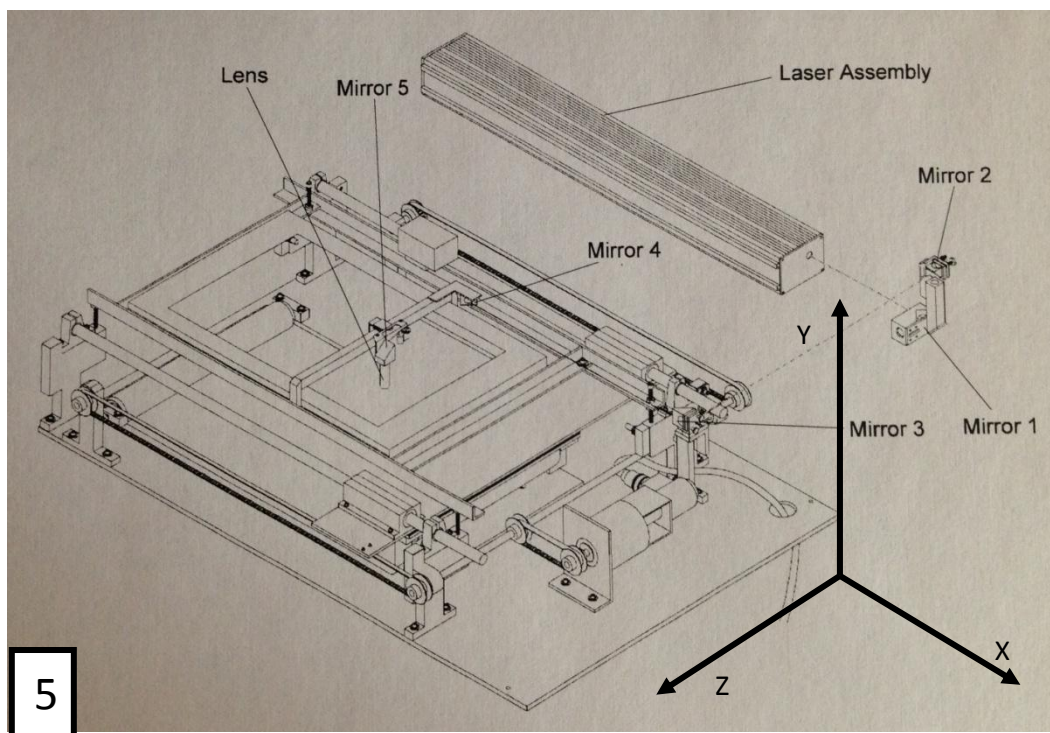
- cavo seriale 1 per il collegamento del mouse (nella foto "SRL#1" da collegare nella porta etichettata "SRL#1");
- cavo seriale 2 per il collegamento computer-scheda GALIL posta nel retro del macchinario (nella foto "SRL#2" da collegare nella porta etichettata "SRL#2");
- presa VGA per il monitor (nella foto "MONITOR" da collegare alla scheda #6);
- cavo collegamento tastiera;

- ingresso alimentazione computer e uscita per alimentazione monitor;
- connettore A per regolazione e gestione laser;
- connettore B, connettore J4 e connettore J5 per la gestione rullo e la movimentazione apparato carta (J4 e J5 rispetto a tutti gli altri connettori sono cablati direttamente all'interno del computer e non dietro al case);

N.B: esiste anche un collegamento interno al case del computer, cioè tra scheda #5 e lettore CD, il quale è posto in parallelo con l'hard disk (vedi foto seguente).

La foto qui sotto mostra il verso di connessione dei connettori J4 e J5 sulla scheda #2.

Si nota come le schede #4 (ethernet) e #3 (modem) non siano di alcuna importanza per il funzionamento del macchinario.

Per quanto riguarda i connettori A, B, SER#2, J4 e J5, una volta collegati al computer, essi proseguono sin dietro al macchinario dove è situata tutta la componentistica elettrica e la scheda

GALIL (per accederci bisogna rimuovere un pannello in plexiglass). Nella figura seguente sono mostrati i collegamenti sul retro del macchinario provenienti dal computer:

3.4 Allineamento/focalizzazione laser e controllo cinghie movimentazione

Siamo partiti dal generatore fascio laser (nella foto 1 si nota il sistema di raffreddamento, sotto di esso ovviamente si trova il generatore del fascio laser da 25W a CO_2) perfettamente funzionante e stabile.

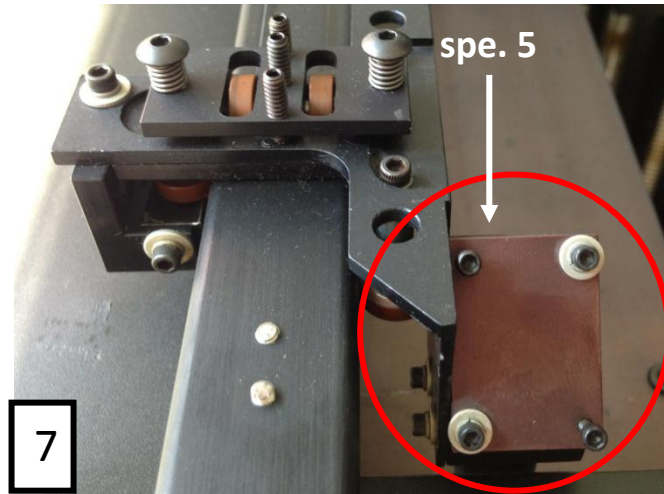
Abbiamo quindi verificato e regolato il sistema di specchi e di lenti che conducono il laser dal generatore fino al piano porta pezzo (nelle foto 2, 3 e 4 in ordine dall'uscita del generatore).

Nella foto 5 abbiamo la disposizione degli specchi nel complessivo.

Gli specchi 1 e 2 non sono visibili dato che essi sono integrati nel generatore (vedi foto 2). Ora fissato un sistema di riferimento solidale al piano porta pezzo possiamo procedere con le possibili orientazione di tutti gli specchi:

- Specchio 1: non è orientabile ed è fisso;
- Specchio 2: orientabile mediante rotazioni lungo assi X e Y ma è fisso;
- Specchio 3: orientabile mediante rotazioni lungo assi X e Y ma è mobile in tutte e tre le direzioni X, Y e Z (foto 2);
- Specchio 4: orientabile mediante rotazione lungo asse Y e mobile lungo il pino XZ (foto 3);
- Specchio 5: orientabile mediante rotazioni lungo assi X e Y ma è fisso (foto 4);

Nella foto 4 si nota inoltre il sistema di lenti che focalizzano il laser sul pezzo in sostruzione.

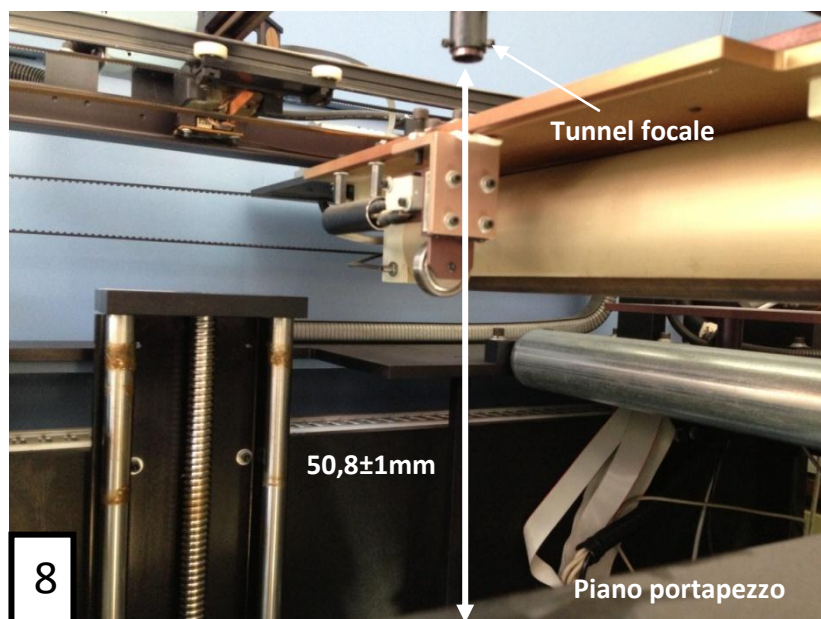
Per l'effettivo procedimento di allineamento laser invece:

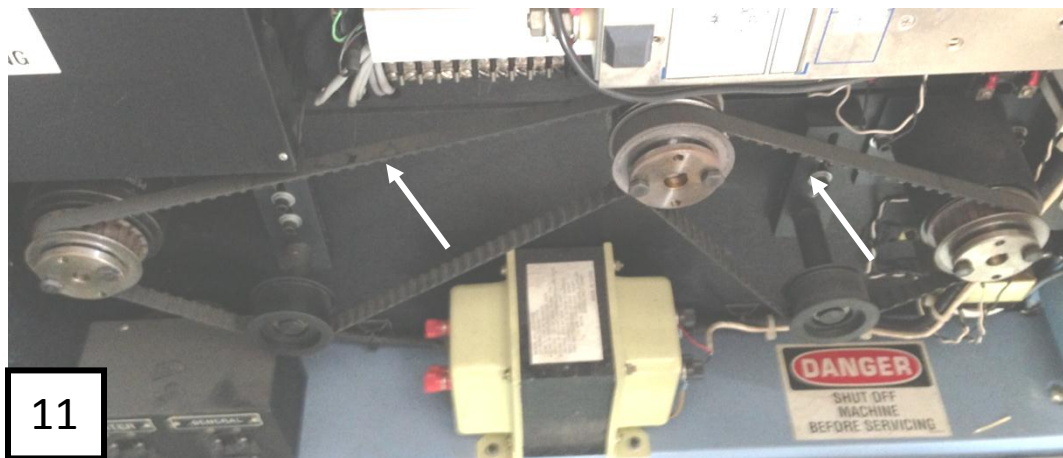
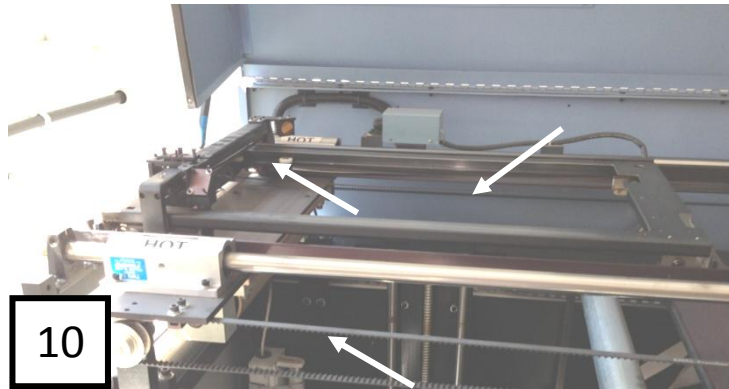
1. Accendere il diodo che genera il laser guida (di colore rosso);
2. Porre un pezzetto di nastro di carta adesivo sullo specchio 4 in modo da distinguere meglio il posizionamento del punto laser sullo specchio;
3. Posizionare l'intero sistema di specchi mobile nella posizione "home" (foto 6);

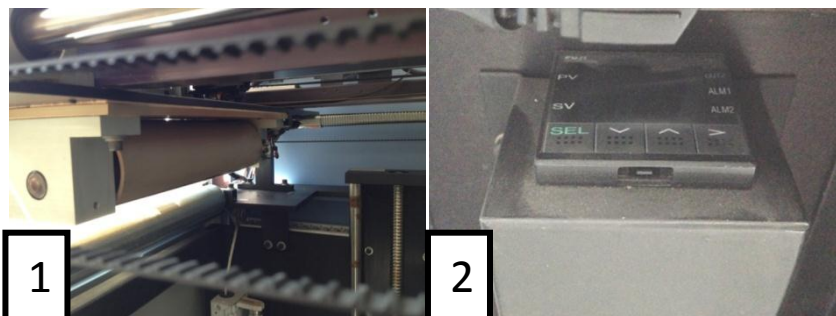
4. Utilizzando le viti sullo specchio 3 per centrare il punto laser sullo specchio 4, spostare poi lo specchio 4 lungo l'asse X e verificare che si mantenga l'allineamento;
5. Allineare ora il punto laser sullo specchio 5 (il pezzo di nastro adesivo va staccato dallo specchio 4 e posto sullo specchio 5) utilizzando la stessa procedura descritta nel punto precedete;
6. Una volta allineato il punto laser nello specchio 5 utilizzare le 4 viti per centrare il fascio laser attraverso le lenti (vedi foto 7);

7. Ripetere i punti 5 e 6 spostando lo specchio 5 dalla posizione home in un qualsiasi altro punto del piano XY in modo da accertarsi che l'allineamento sia sempre garantito;

Ultimato l'allineamento del laser si procede con un "Digita Laser Power Meter", strumento che permette di misurare l'intensità del fascio laser (in W); il valore non deve essere inferiore ai 20W, se questo non viene rispettato bisogna assicurarsi che gli specchi siano puliti e poi ripetere l'operazione.

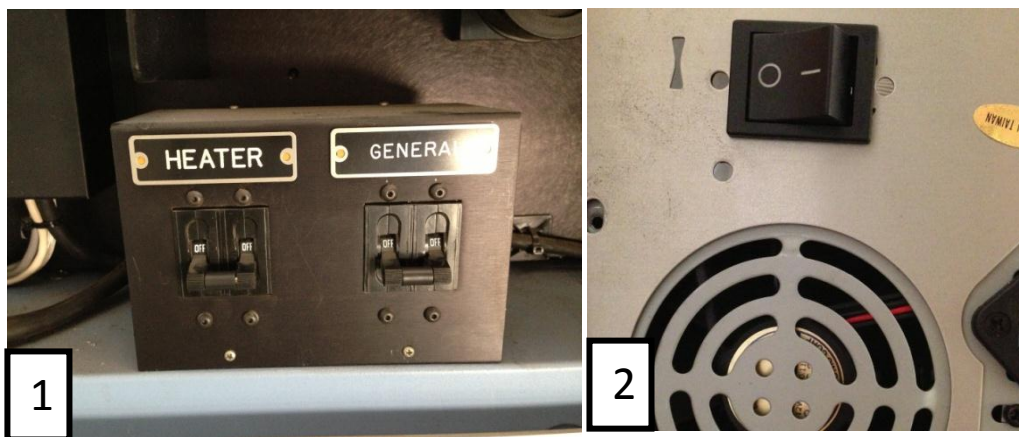
Ora, il passo successivo è quello della regolazione focale delle lenti: essa serve a concentrare e a mettere a fuoco il punto sul piano portapezzo quando quest'ultimo si trova nella posizione di massima elevazione. La distanza tra l'uscita dal tunnel di focalizzazione e il piano portapezzo deve essere di 50.8 ± 1 mm. Non è necessaria un'assoluta precisione poiché possiamo compensare l'errore sulla distanza modificando la messa a fuoco del punto laser sul piano porta pezzo.

Se è vero però che la distanza tra tunnel focale e piano portapezzo non richiede molta accuratezza (rispettando ovviamente la forcella data, 50.8±1mm, vedi foto 8) al contrario questa distanza deve essere la stessa per tutti i punti del piano portapezzo.

Nel caso in cui questa distanza non fosse garantita per tutti i punti si procede alla regolazione di 4 viti posizionate agli angoli del piano portapezzo fino a che il piano creato dal movimento del laser in X e Y e il piano portapezzo non sono esattamente paralleli (vedi foto 9).

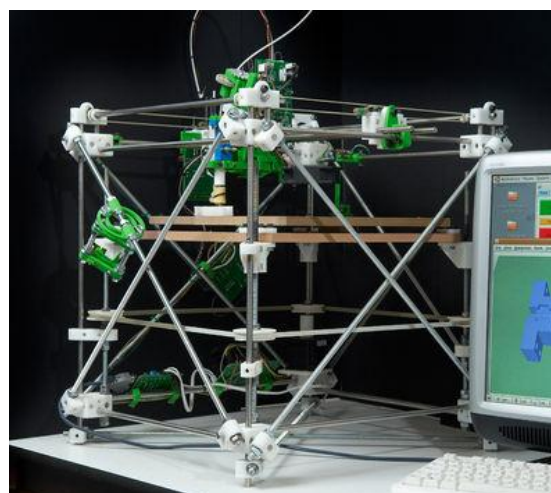
Per quanto riguarda la movimentazione, la Lom Helisys 1015 utilizza una sistema di motori che azionano delle cinghie: esse devono sempre essere tese e non devono mostrare alcun segno di "spanciamento", altrimenti sarebbe compromessa l'accuratezza sul posizionamento del laser.
Le cinghie fondamentali sono quattro, due riguardano il movimentano del laser lungo X e Y (foto 10), mentre la terza e la quarta si occupano della movimentazione della carta (foto 11).

3.5 Rullo riscaldante

Fondamentale per il processo Lom è il rullo riscaldante che permette di saldare i fogli mediante un processo di "rullatura a caldo" (foto 1) . La movimentazione del rullo è lungo l'asse X , la sua velocità dipende dello spessore della carta, mentre la temperatura dipende dalla tipologia della termocolla presente nella carta (cfr.§2.7.2). Solitamente la temperatura del rullo viene settata a 150°C (nella foto 2 è rappresentato l'apparato di termoregolazione) in modo che possa adattarsi a qualsiasi tipo di carta; per regolare l'apporto di calore sul foglio steso si interviene solo sulla velocità di rullatura.

3.6 Operazioni per l'accensione

Dopo essersi assicurati che la macchina sia collegata alla rete elettrica mediante le due prese shuko poste sul retro del macchinario:

1. azionare l'interruttore generale posto dietro alla macchina (nella foto 1, indicato con *GENERAL*);
2. azionare l'interruttore del rullo riscaldante (nella foto 1, indicato con *HEATER*);
3. accendere il pc mediante l'interruttore nero posto dietro al case (foto 2);
4. aspettare l'avvio del sistema operativo e aprire il programma LomSlice.

CAPITOLO 4
STAMPANTE "HOME MADE" E PROGETTO REPRAP

Questo capitolo finale nasce come alternativa alla riparazione della Lom Helisys 1015. Anziché investire sulla riparazione del suddetto macchinario personalmente opterei per la costruzione di una nuova macchina per il RP, precisamente una RepRap a tecnologia Fdm. Il progetto per la realizzazione del macchinario è completamente "open source" ed è possibile personalizzarlo secondo le proprie necessità.

Tutto iniziò nel 2005 quando il docente universitario Adrian Bowyer dell'Università di Bath, Regno Unito, decise di fondare il progetto RepRap ("Replicating Rapid Prototyper"). Lo scopo di questo progetto era quello di dare la possibilità a chiunque di realizzare la propria stampante 3D a tecnologia Fdm, limitando di molto le spese rispetto alle stampanti in commercio già assemblate. I materiali e le componenti utilizzate dovevano essere facilmente reperibili e alla portata di chiunque volesse cimentarsi nella costruzione della stampante.

Ovviamente dal 2005 ad oggi nel progetto RepRap si sono susseguiti tre modelli di stampanti (tutte a tecnologia Fdm e con lo stesso principio di controllo e movimentazione): il primo fu il modello "Darwin" (vedi foto sopra) con struttura a cubo, il secondo "Mendel" a struttura prismatica triangolare e il terzo, nato di recente, "Huxley" (rispetto al modello Mendel, Huxley vanta dimensioni complessive inferiori al 30%).

Nelle pagine seguenti verrà esposto il modello ***Mendel Prusa i2***: esso è stato realizzato ed ottimizzato dal laureando in ingegneria meccatronica Fabio Righetti, dal laureando in ingegneria gestionale Riccardo Bertagnoli e dal sottoscritto. Come già citato in precedenza, la tecnologia utilizzata è sempre una tecnologia Fdm con un volume di stampa di circa (200 mm lungo l'asse X) x (200 mm lungo l'asse Y) x (130 mm lungo l'asse Z), nettamente inferiore alla Helisys; nonostante questo, a parità di investimento è possibile ottenere una stampante completamente nuova che garantisce non solo prototipi concettuali ma anche prototipi funzionali.

Questo capitolo non ha la presunzione di fungere da vero e proprio manuale, ma cerca di introdurre nel mondo delle stampanti 3D "home made" chiunque fosse interessato.

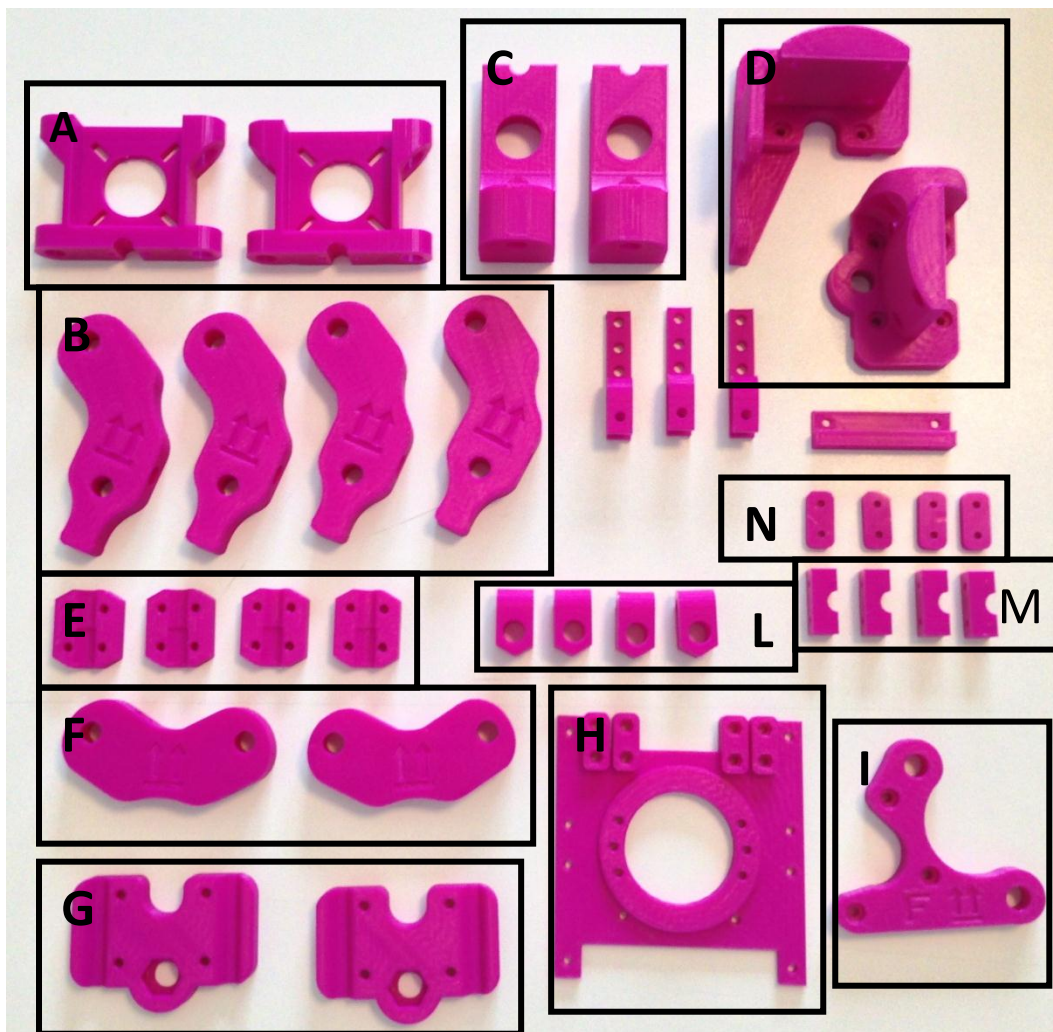
4.0 Presentazione modello Mendel Prusa i2

Il progetto RepRap Mendel Prusa i2, come accennato precedentemente, utilizza la tecnologia Fuse Deposition Modeling, un estrusore alimentato da una ruota dentata che trascina al suo interno un polimero termoplastico (ABS o PLA sotto forma di filo con un Ø 1.75mm) creando il prototipo su di un piano mobile. I volumi di stampa massimi sono 150x150x130mm; le velocità di stampa e l'errore massimo sul posizionamento dell'estrusore dipendono dalla qualità della componentistica scelta e dall'accuratezza del montaggio del telaio. In generale questa stampante è in grado di garantire precisioni superiori al decimo di millimetro e discrete velocità di stampa circa 10mm/h.
Le parti in plastica (nelle foto seguenti di colore fucsia, ABS) sono l'unico aspetto vincolante; per tutte le altre componenti e le loro dimensioni, invece, abbiamo completa libertà di scelta dato che tutto dipende dalle dimensioni finali che la nostra macchina dovrà avere (ovviamente maggiore sarà il volume del macchinario, maggiore sarà il volume di stampa). Chiunque possieda una stampante 3D a tecnologia Fdm può stampare tutte le plastiche necessarie alla realizzazione delle Mendel Prusa i2.

4.1 Componenti

Possiamo dividere le componenti necessarie per la realizzazione della stampante in tre grandi gruppi:

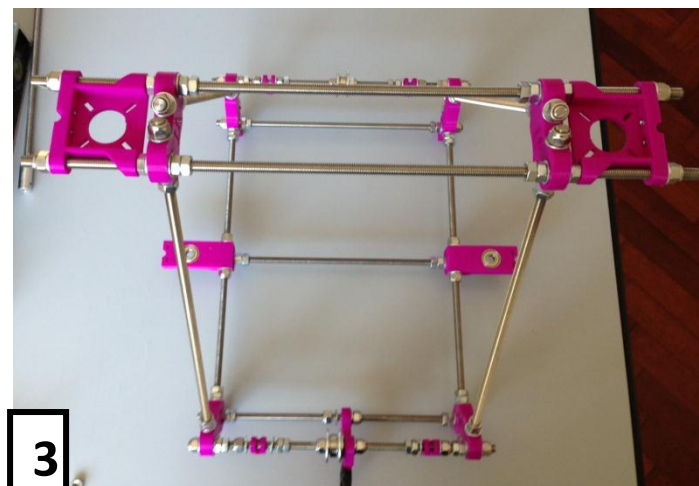
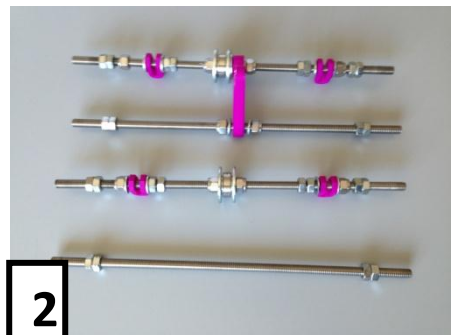
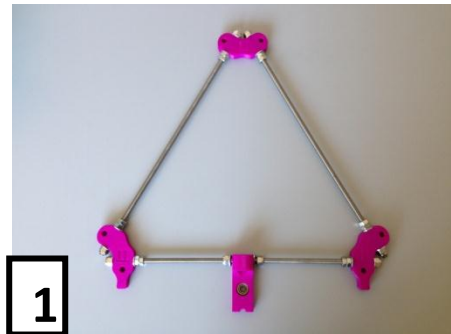
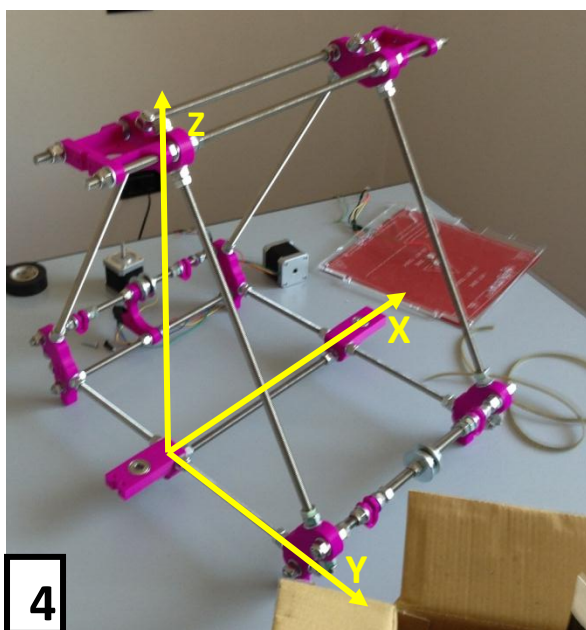
1. Cuscinetti e componenti in acciaio inox AISI 304:
   - barra filettata da Ø8mm x 440mm passo grosso per la movimentazione lungo l'asse Z (2 pez.);
   - barra filettata da Ø8mm x 400mm passo grosso per strutture triangolari (6 pez.);
   - barra filettata da Ø8mm x 300mm passo grosso per struttura telaio (4 pez.);
   - barra filettata da Ø8mm x 450mm passo grosso per struttura telaio (1 pez.);
   - barra filettata da Ø8mm x 320mm passo grosso per struttura telaio(2 pez.);
   - barra cromata rettificata Ø8mm x 350mm per guida cuscinetti in tecnopolimero;
   - barra cromata rettificata Ø8mm x 420mm guida per cuscinetti in tecnopolimero;
   - 80 dadi M8 (UNI EN 24034);
   - 72 rondelle Ø8x17 categoria A (UNI 6592);
   - 8 rondelle Ø8x32 categoria A (UNI 6592);
   - 40 dadi autofrenanti M8 (UNI 7473);
   - 6 cuscinetti a sfere SKF 608-RSL e 12 cuscinetti lineari in tecnopolimero KSTM-08;
   - barra filettata da Ø8mm x 70mm perno reggi puleggia;
   - estrusore.

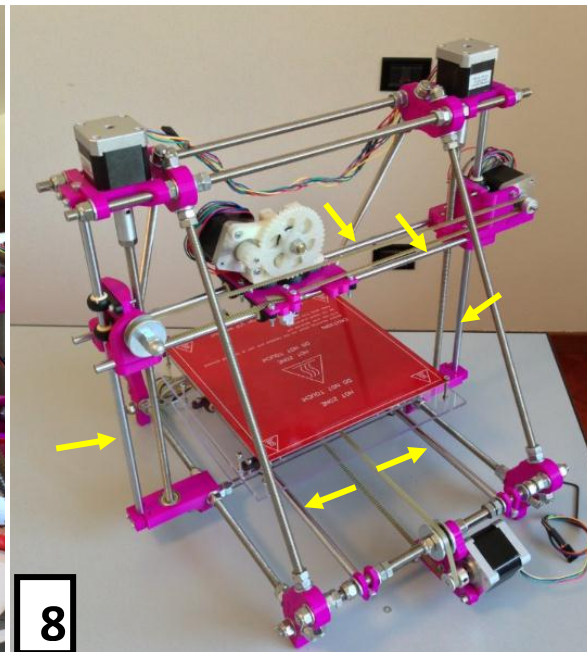
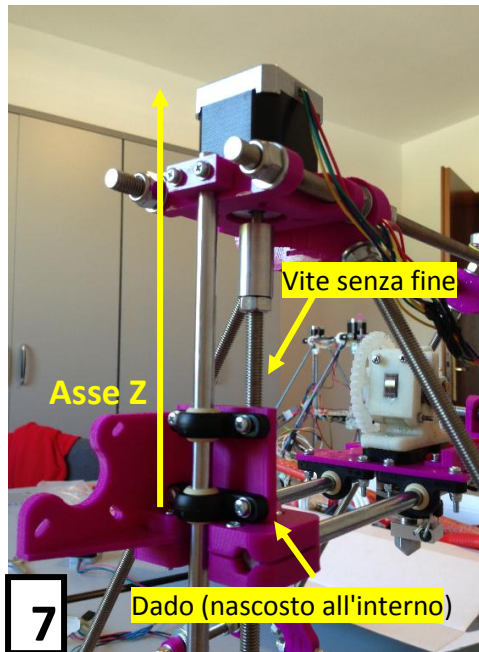
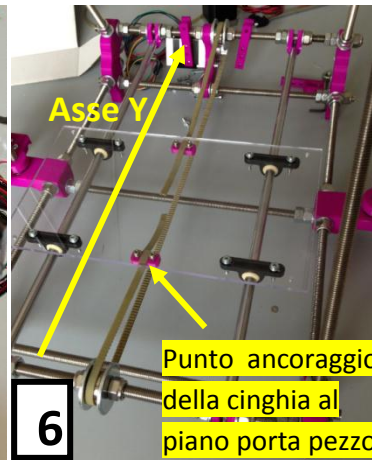
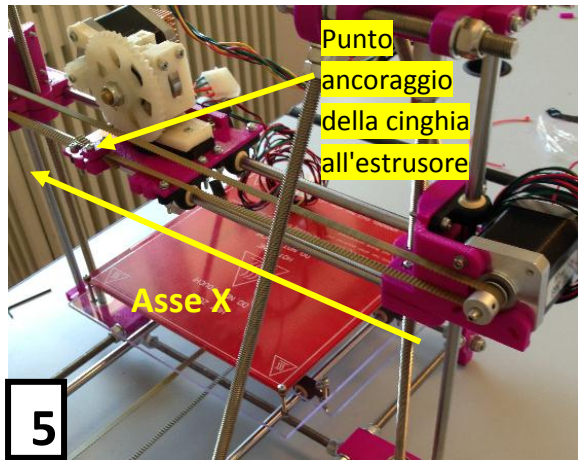
2. Componenti in ABS (nell’immagine sotto è riportato l’intero spaccato di tutte le parti in ABS) fungono da: nodi per il telaio, sostegni per i motori passo-passo, blocco cinghie e tendi cinghie e organi di trasmissione per il sistema di alimentazione dell’estrusore:
    - sostegni motori movimentazione asse Z e sostegno barre lisce (insieme A);
    - nodi per la struttura con piedini d'appoggio (insieme B);
    - sostegni cuscinetti barre filettate per movimentazione asse Z (insieme C);
    - sostegno estrusore (insieme H);
    - sostegno motore e porta puleggia per movimentazione asse X con sostegno barre lisce (insieme D e G);
    - sostegno motore movimentazione in Y (insieme I);
    - sostegni barre lisce per movimentazione in Y (insieme L);
    - fissaggi barre lisce asse Z (insieme M);
    - blocca cinghie asse X e Y (insieme N);
    - pezzi non contrassegnati sono per il sostegno dell'elettronica.

3. Componenti elettroniche e motori passo passo:
    - 5 motori passo-passo bipolari;
    - 3 switch di fine corsa;
    - 4 driver per motori passo-passo A4988 Pololu;
    - scheda principale :Sanguinololu versione 1.3a (derivata dall'Arduino);
    - resistenza per l'estrusore;
    - 2 termistori da 100 KΩ;
    - piano riscaldante;
    - gruppo di alimentazione 12V (non inferiore a 500W).

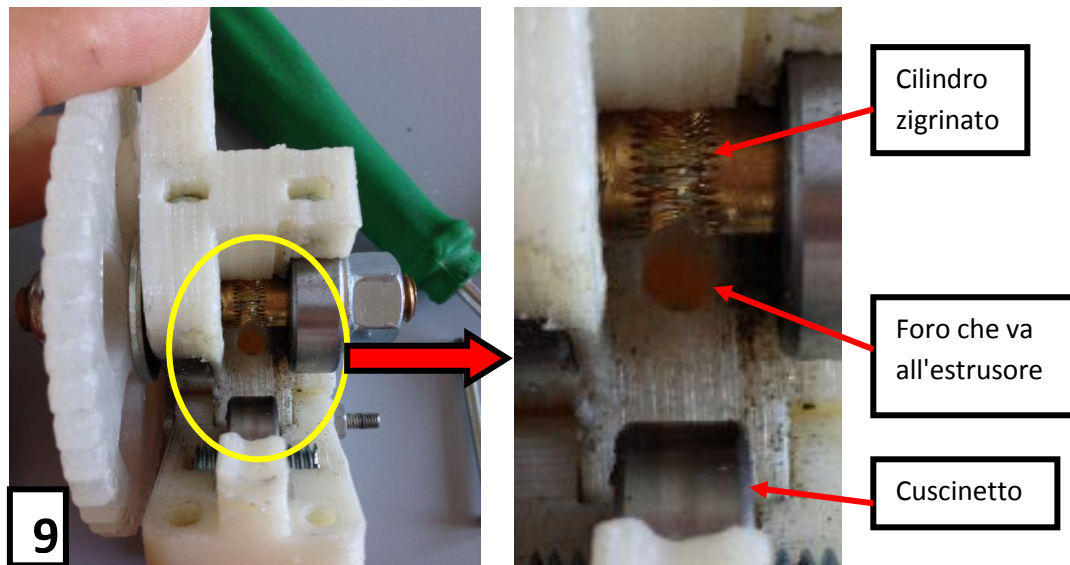
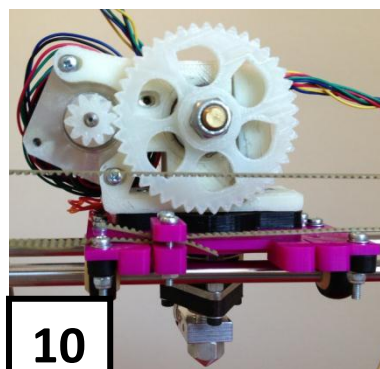
4.2 Costruzione telaio e installazione guide di movimentazione

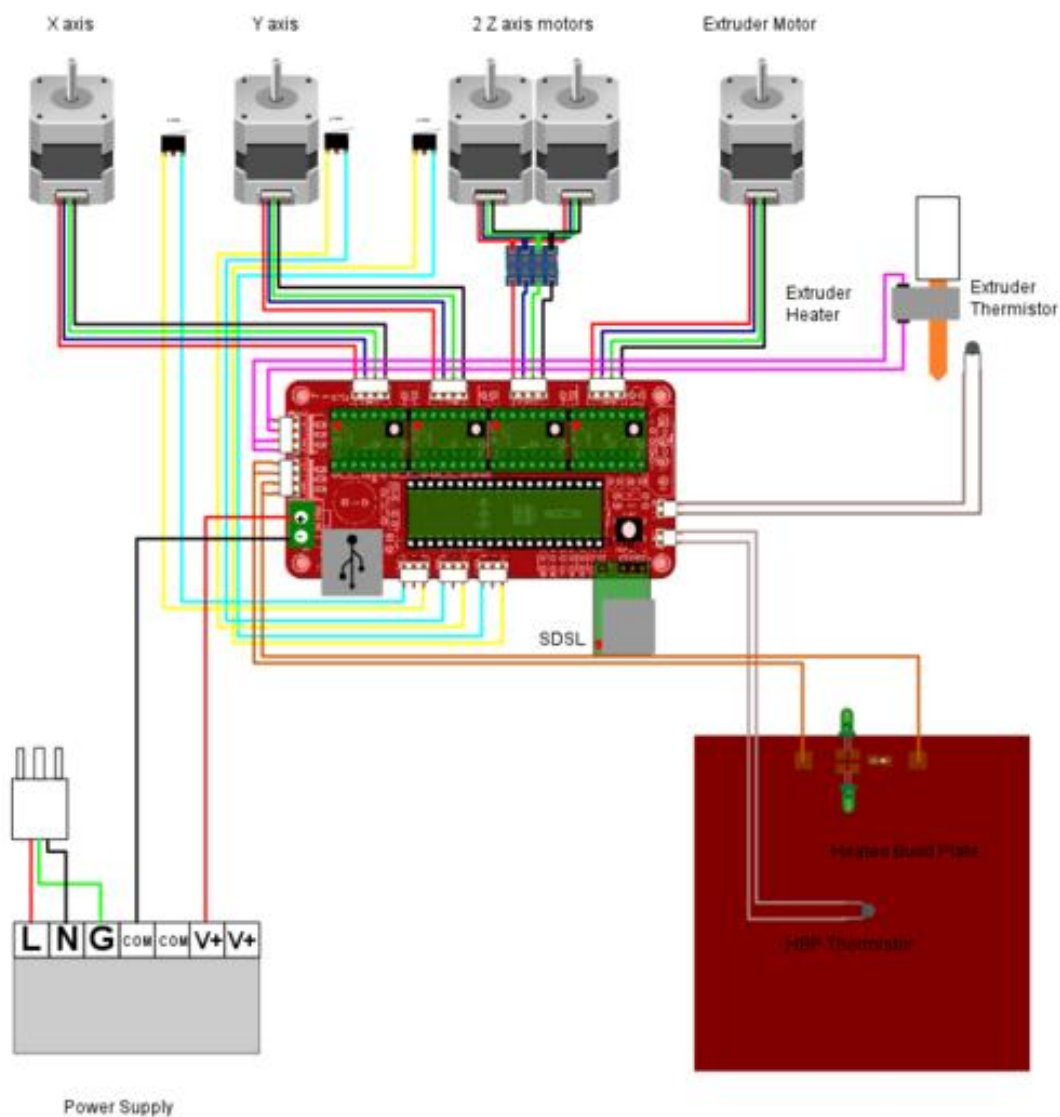
Il telaio della Mendel Prusa i2 altro non è che una semplice struttura reticolare prismatica, suddivisibile in: due telai triangolari (foto 1) che contribuiscono a sorreggere la struttura e da barre orizzontali (foto 2) che collegano i due triangoli garantendo rigidità e stabilità.

Tale struttura è composta interamente da barre filettate in modo che essa sia completamente scalabile; infatti, utilizzando la similitudine dei triangoli è possibile realizzare telai di piccole dimensioni (300x300x300mm) oppure telai di medie dimensioni come quello in figura (le barre filettate in figura A hanno una lunghezza di 400mm). I nodi sono costituiti da blocchi in ABS anch'essi creati mediante un'altra stampante a tecnologia Fdm (vedi spaccato componenti §4.1.). Le strutture triangolari e le barre trasversali vengono collegate mediante le parti in ABS (in viola nelle foto) per dar vita al telaio della macchina (foto 3).

Si nota che nel telaio vengono integrate, durante l'assemblaggio, anche le parti che sosterranno la meccanica (le staffe d'appoggio, vedi insieme B). La struttura viene fissata e allineata mediante una livella laser e un calibro centesimale in modo che il telaio risulti perfettamente

allineato in tutte le sue parti. Per quanto riguarda la movimentazione per la creazione del prototipo essa si suddivide in due parti: la movimentazione dell'estrusore e la movimentazione del piano portapezzo. Al primo infatti è affidata la movimentazione lungo l'asse Z e lungo l'asse X, al secondo è affidatala movimentazione lungo l'asse Y. Lo spostamento in Z avviene mediante le due viti senza fine perpendicolari al piano porta pezzo che alzano o abbassano l'astrusore, lo spostamento in X invece avviene mediante cinghie fissate al sostegno dell'estrusore. Riassumendo quindi l'estrusore è libero di muoversi lungo il piano ZX (vedi foto 4). Per quanto la movimentazione in Y essa avviene, come per l'asse X, mediante cinghie fissate al piano portapezzo.

Ora chi compie il vero processo di movimentazione sono ovviamente i motori; l'asse Z, essendo movimentato dalle due viti senza fine avremo bisogno quindi di due motori passo-passo che lavorino in perfetta sincronia (si vedrà nel §4.3 come i due motori siano collegati in parallelo). Per quanto riguarda l'asse Y il corrispondente motore passo-passo traina il piano portapezzo sia nella direzione positiva sia in quella negativa. Per l'asse X il corrispondente motore passo-passo traina l'estrusore sia nella direzione positiva sia in quella negativa. L'immagini seguenti chiariscono quanto appena spiegato (foto 5 configurazione movimentazione asse Y, foto 6 configurazione movimentazione asse X e foto 7 configurazione movimentazione asse Z). Nella foto 5, la cinghia è solidale all'estrusore, quindi ad una rotazione oraria del motore passo-passo corrisponde un avanzamento dell'estrusore nel verso positivo dell'asse X. Nella foto 6, la cinghia è solidale al piano in plexiglass, quindi ad una rotazione oraria del motore passo-passo corrisponde un avanzamento del piano portapezzo nella direzione positiva dell'asse Y. Infine, nelle foto 7, la chiocciola della vite senza fine (nel nostro caso è un semplice dado con il tracciato elicoidale di

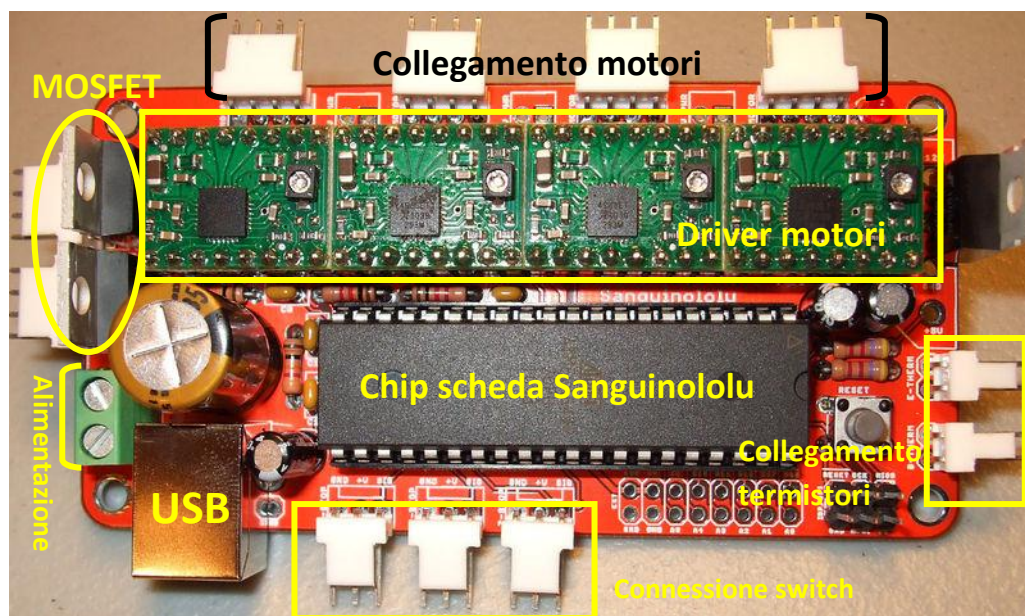
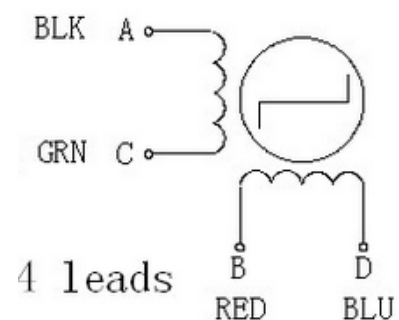
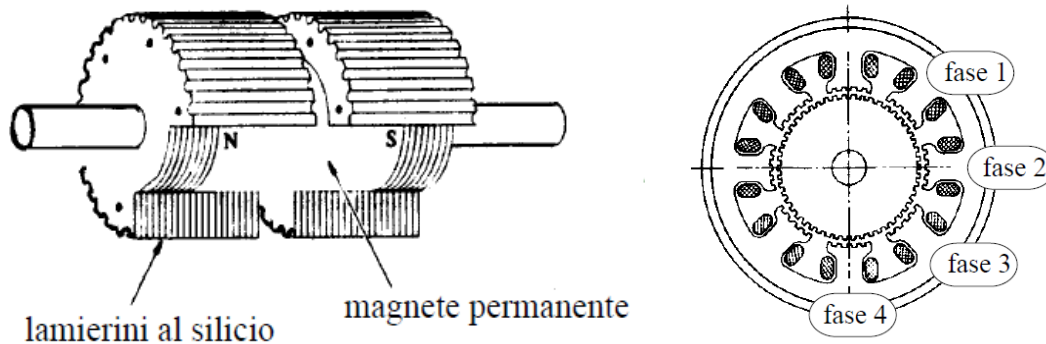
filettatura destrorso) è solidale alle guide di scorrimento dell'estrusore, quindi ad una rotazione oraria del motore passo-passo corrisponde un abbassamento dell'estrusore nel verso negativo dell'asse Z (il sistema di riferimento usato coincide con quello dell'immagine 4).

Per mantenere l'ortogonalità fra le tre direzioni di movimentazione il macchinario utilizza delle barre lisce sulle quali scorrono delle cuscinetti in tecnopolimero (per una maggiore precisione si possono sostituire con cuscinetti lineari a ricircolo di sfere). Nella foto 8 sono evidenziate tutte le barre lisce utilizzate per gli spostamenti estrusore/piano porta pezzo. Per quanto riguarda il congegno d' alimentazione dell'estrusore (come sappiamo il polimero arriva all'estrusore sottoforma di filo con Ø1.75), il suo funzionamento si basa su un meccanismo molto semplice, si tratta di un cilindro zigrinato in ottone (posto in rotazione da un motore passo-passo) che lavora in opposizione ad un cuscinetto a sfere. Il filo quindi é intrappolato tra la il cilindro, che oltre ad

essere zigrinato ha anche la sagoma in negativo del filo, e il cuscinetto. La ruote dentata ruota in modo da spingere all'interno dell'estrusore il filo (vedi foto 9).

La distanza tra il cilindro zigrinato e il cuscinetto è ovviamente regolabile in modo da aumentare o diminuire la pressione di contatto tra filo e cilindro (materiali come il PLA hanno un bassissimo coefficiente d'attrito quindi per garantire una corretta alimentazione dell'estrusore richiedono maggior pressione). Il motore passo-passo dedicato all'alimentazione dell'estrusore movimenta mediante un rapporto di trasmissione $\tau = \frac{z_2}{z_1} = \frac{44}{10} = 4.4$ il cilindro zigrinato (con il pedice "1" si indica la ruota conduttrice, con il pedice "2" si indica la ruota condotta). Servono infatti velocità di rotazione molto ridotte, basti pensare che il diametro del filo apportato è di 1.75mm mentre il diametro dell'estruso, senza tener conto del fenomeno rigonfiamento, è di soli 0,1 mm. Ragionando in termini di portata, se si volesse una velocità di prototipazione di 150mm/s l'estruso dovrebbe fluire almeno con la stessa velocità (nella pratica la velocità dell'estruso è di poco superiore alla velocità di prototipazione in modo da garantire la copertura del percorso tracciato); con alcuni passaggi algebrici si ottiene che la velocità d'entrata del filo da estrudere, per garantire una velocità dell'estruso di 150mm/s, è di 0,49 mm/s. Il rapporto di trasmissione aumenta anche la coppia del motore, ciò è essenziale se si vogliono impostare alte pressioni di presa.

4.3 Cablaggio generale

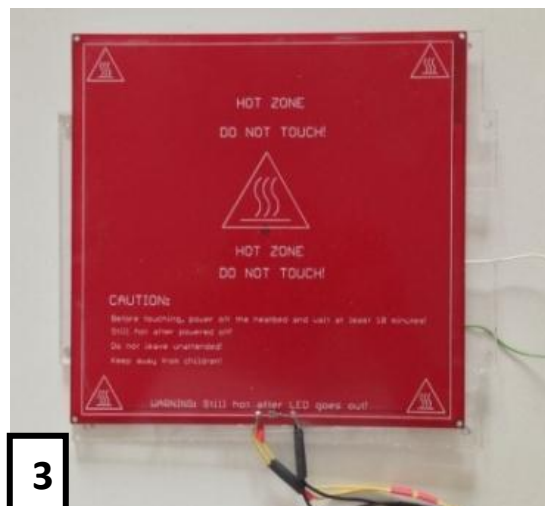
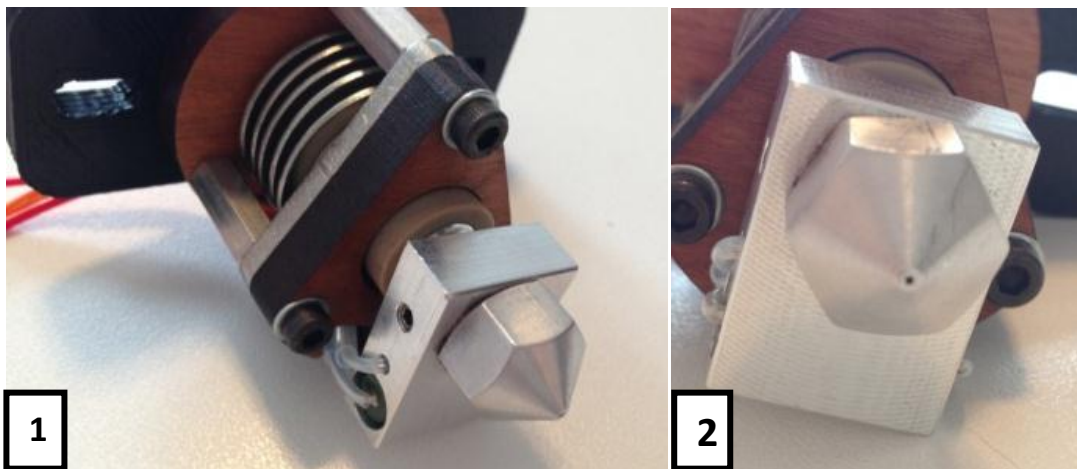
Lo schema seguente riassume con estrema accuratezza tutto il cablaggio della macchina. Si tratta di circuiti in corrente continua; il tutto è controllato da un processore (integrato nella scheda rossa) il quale, a sua volta, riceve istruzioni da un computer direttamente dalla porta usb. Come si nota nello schema, tutti i motori sono controllati a catena aperta, quindi senza l'ausilio di encoder o di qualsiasi altro dispositivo che ne verifichi l'effettiva rotazione. Per l'estrusore e il piano riscaldante, invece, si ha un controllo in retroazione mediante termistori da 100KΩ.

La scheda posta al centro è una Sanguinololu ver. 1.3a realizzata appositamente da una ditta coreana per il modello Mendel Prusa i2. La sua funzione è quella di tradurre le informazioni in coordinate macchina derivanti del computer in impulsi elettrici atti a movimentare i 5 motori

"stepper". Il nome della scheda richiama anche il nome della ditta "Pololu" che produce i driver per i motori passo passo in questione.

I driver per i motori (modello:A4988) altro non sono che delle piccole schede cablate e tarate per garantire una determinata risoluzione angolare del motore. Nella foto seguente, i driver sono i quattro quadratini verdi (sono 4 e non cinque, dato che i due motori che movimentano l'asse Z sono collegati in parallelo).

Si possono notare anche i MOSFET che regolano, sotto il controllo del processore, la corrente che passa per il resistore che scalda l'estrusore, e la corrente che passa per la lastra PCB (a sua volta scalda il piano portapezzo, lo si fa per evitare ritiri termici del prototipo durante la sua costruzione). I MOSFET traducono le informazioni binarie del processore in aperto/chiuso; grazie al controllo in retroazione dei termistori il processore invia le informazioni al MOSFET che funge da vero e proprio interruttore per la corrente, determinando un innalzamento della temperatura nei resistori.

Per quanto riguarda i cinque motori passo-passo, abbiamo scelto quelli costruiti dalla Wantai Motor modello: 42BYGHW609. Essi sono dei motori ibridi, infatti funzionano secondo due principi fisici: la riluttanza variabile e il campo generato dai magneti permanenti posti nel rotore. Ogni motore conta quattro fili (terminali delle due fasi, vedi figura a lato). Ciascuna fase è alimentata da un "ponte H" che permette di scegliere e modificare il verso della corrente che passa per gli avvolgimenti dello statore. Ogni fase consiste in 4 avvolgimenti sfasati a 90° posti in

serie, quelli della prima fase sono ruotati di 45° rispetto a quelli della seconda. Ogni coppia polare (si intendono le coppie di avvolgimenti opposti rispetto al centro di rotazione) mantiene lo stesso verso di avvolgimento dei conduttori così da generare flusso magnetico concorde. La seconda coppia polare, facente capo agli stessi terminali, genera flusso magnetico opposto. Questa disposizione dei flussi verrà sfruttata dal rotore "multi-stack" (vedi immagini sotto).

Il rotore è composto da quattro "stack" (per comodità, nella figura sovrastante di destra sono stati raffigurati solo due stack), cioè da una serie di quattro cilindri contornati da cinquanta dentini (garantiscono l'anisotropia rotorica essenziale per il fenomeno della riluttanza variabile); tra il primo stack ed il secondo abbiamo uno sfasamento di mezzo passo, inoltre il primo stack è in fase con il terzo e il secondo con il quarto.
La combinazione di 4 fasi dello statore e dei 50 denti del rotore consente al motore passo-passo una risoluzione di 200 passi/giro ottenendo quindi una risoluzione angolare di 1.8° (=360°/200). Ovviamente, la risoluzione angolare offerta dal motore è insufficiente per ottenere la precisione di posizionamento desiderata, ed è proprio qui che subentrano i driver dei motori passo-passo pilotando i motori in micro-stepping. Questo metodo di controllo consiste nella modulazione delle correnti inviate nelle fasi, così da individuare una serie di posizioni di equilibrio tra quelle originarie del motore. In base alla regolazione scelta è possibile ottenere una risoluzione superiore di 8, 16 o 32 volte. Nel nostro caso abbiamo impostato i driver in modo che garantiscano nei motori una risoluzione angolare di $\frac{1.8°}{16}$ pari a 0.1125° (avendo un raggio di puleggia di 5 mm corrisponde a 70µm circa di spostamento minimo). Le caratteristiche tecniche dei motori passo-passo utilizzati sono: alimentazione 3.4V, corrente massima di alimentazione 1.7 A, resistenza 2Ω, induttanza 3mH, coppia motrice massima 4000g/cm pari a circa 0.4N/m.
Per quanto riguarda l'estrusore (fig. 1 e 2) e il piano riscaldante (fig. 3) essi sono cablati direttamente ai MOSFET ed utilizzano la maggior parte della potenza assorbita dall'intero processo di prototipazione, infatti nella figura della Sanguinololu si nota la morsettiera verde nella quale si collega l'alimentatore della macchina. Al contrario, la parte digitale della scheda non viene alimentata dall'alimentatore ma direttamente dalla porta usb.

Diminuendo le dimensioni del foro estrusore (fig. 2) si possono ottenere risoluzioni di stampa maggiori a discapito, però, di una più ridotta velocità di stampa (nel nostro caso l'estrusore scelto ha un foro d'estrusione di due decimi di millimetro).

L'unico limite che riguarda le macchine a tecnologia Fdm è l'impossibilita di avere l'assoluto controllo sull'estrusione: essa infatti non può essere attivata o fermata istantaneamente dato che possiede una sua inerzia. Questa è dovuta alla pressione con cui il filo viene accompagnato all'interno dell'estrusore, pressione che a causa degli attriti non è costante. Infatti, il filo di polimero termoplastico funge da pistone che estrude la parte di esso a sua volta fusa dall'estrusore. Nella fig. 1 si nota infatti come la parte iniziale dell'estrusore sia dotata di alette atte ad asportare calore, in modo che il filo in entrata conservi la sua rigidezza; man mano che si procede verso il foro d'estrusione la temperatura aumenta e il filo passa dalla fase solida alla fase fluida. Il termistore nell'estrusore è di fondamentale importanza dato che controlla in continuo la temperatura e fa sì che essa non oltrepassi mai quella di denaturazione del polimero. Per quanto riguarda le temperature del piano portapezzo, esse solitamente sono circa la metà della temperatura di fusione del polimero utilizzato e permettono ai primi strati estrusi di mantenere una buona adesione, fissando saldamente il pezzo in costruzione al piano porta pezzo.

4.4 Software

I programmi necessari per il funzionamento della macchina sono un CAD per generare il modello 3D (preferibilmente in formato .stl), un CAM dedicato per trasformare il file .stl in coordinate macchina e un firmware installato sulla scheda Sanguinololu per far eseguire alla macchina lo slicing effettuato dal CAM. Il CAM consente inoltre di applicare le strutture di supporto per le eventuali parti a sbalzo del prototipo, modificare le temperature di processo, creare più prototipi sullo stesso piano porta pezzo e gestire il riempimento dei prototipi.

4.5 Velocità prototipazione e materiali utilizzati

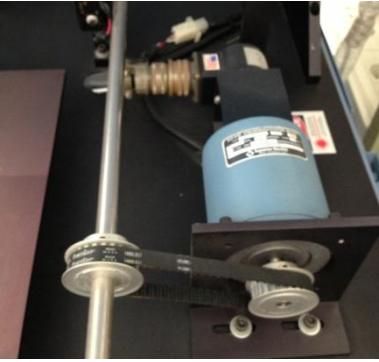
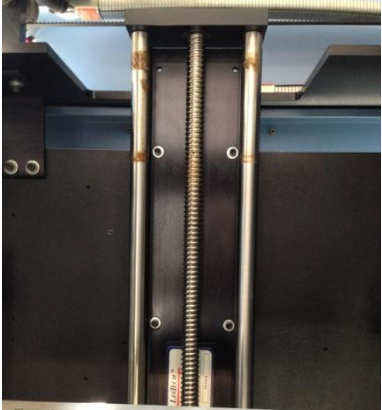
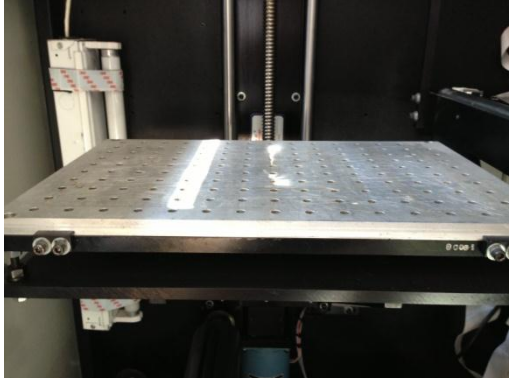
Per i materiali si rimanda al §2.2.2; ricordiamo solo che il polimero termoplastico più utilizzato è l'ABS date le sue ottime caratteristiche sia meccaniche sia di lavorabilità. Per quanto riguarda il coefficiente di riempimento, esso esprime la percentuale sul volume totale del pezzo effettivamente riempito dal polimero estruso. Come già citato nel §2.2.3 non è possibile raggiungere riempimenti pari al 100% e, allo stesso modo, non è possibile ridurre il riempimento sotto l'11%; quest'ultima limitazione deriva dal fatto che la struttura deve poter autosostenersi durante il processo di prototipazione. Il riempimento degli oggetti solidi avviene sempre per piani secondo varie configurazioni: a sovrapposizione parallela (solitamente i bordi sono sempre costruiti secondo questa metodologia), a sovrapposizione intrecciata, o anche a nido d'ape quando si vuole aver un coefficiente di riempimento inferiore al 70%. Per quanto riguarda l'assorbimento di potenza durante la prototipazione nel caso più critico (massima velocità ed alte temperature sia nell'estrusore che nel piano portapezzo) la macchina richiede circa 600W di potenza (normalmente infatti la si alimenta mediante un alimentatore per computer). Per quanto riguarda le velocità di prototipazione esse dipendono dal polimero termoplastico utilizzato e dalla finitura superficiale del prototipo che si vuole ottenere. Le velocità massime di prototipazione ottenibili sono all'incirca di 250mm/s. La velocità di prototipazione inoltre condiziona anche il riempimento del prototipo in costruzione: se si imposta il macchinario affinché realizzi un prototipo con riempimento del 100% allora di conseguenza le velocità devono essere limitate a valori inferiori a 150mm/s (si ricorda che è comunque impossibile ottenere riempimenti del 100%, vedi inizio paragrafo). L'ultimo aspetto condizionato dalla velocità di prototipazione è l'errore di posizionamento estrusore. A velocità basse, ad esempio 80mm/s, si riesce ad ottenere un errore di un decimo di millimetro, per alte velocità invece, ad esempio 230mm/s l'accuratezza diminuisce determinando un errore di oltre 3 decimi di millimetro.

4.6 Pro e Contro del progetto RepRap

Gli svantaggi del progetto RepRap derivano essenzialmente dal limite intrinseco della tecnologia Fdm. Prototipi con elementi a sbalzo sono difficilmente realizzabili se non aggiungendo una moltitudine di strutture di supporto le quali, però, durante la loro rimozione a processo finito, rischiano di compromettere la finitura superficiale del prototipo. Infatti, partendo da una struttura a base circolare si può avere una divergenza con pendenza massima del 50° senza dover apportare strutture di sostegno.

I vantaggi di questo progetto sono moltissimi: esso permette di realizzare una stampante conforme alle proprie esigenze, capace di prototipare oggetti 3D in sole poche ore. Per quanto riguarda l'elenco dei siti Web dove poter reperire il materiale necessario alla realizzazione di una RepRap Mendel Prusa i2 si veda la tabella seguente.

Oggetto	Numero	Costo al pezzo	Costo	IVA	TOTALE	Sito:
5 Motori Stepper	1	€ 55,00	€ 55	11,55	€ 66,55	http://reprapworld.com/?products_details&products_id=94&cPath=1614
Driver Pololu	4	€ 9,99	€ 39,96	8,39	€ 48,35	http://reprapworld.com/?products_details&products_id=92&cPath=1591_1599
Sanguinololu ver .1.3a	1	€ 46,21	€ 46,21	9,7	€ 55,91	http://reprapworld.com/?products_details&products_id=157&cPath=1591_1617
Endstop	3	€ 2,00	€ 6	1,26	€ 7,26	http://reprapworld.com/?products_details&products_id=66&cPath=1591_1612
RepRap PCB Heatbed MK2 Deluxe Kit	1	€ 60,00	€ 60	5,25	€ 65,25	http://reprap.me/epages/reprap_nu_4149051.sf/en_US/?ObjectPath=/Shops/reprap_nu_4149051/Products/%22RepRap%20Heatbed%20Deluxe%22

Ventoline raff. 30*30 (Pezzo, Estrusore)	3	€ 2,49	€ 7,47	1,05	€ 8,52	
Colla termica	1	€ 3,99	3,99	0,84	4,83	
Alimentatore CX430 corsair	1	€ 44,00	€ 44	0	€ 44	http://www.amazon.it/s/?ie=UTF8&keywords=corsair+cx+430&tag=slhyin-21&index=aps&hvadid=14664817754&ref=pd_sl_4adnl2l56b_b
Bobina ABS 3mm 1kg	1	16,99	16,99	3,57	20,56	http://shop.sharebot.it/ABS
Calze termo retraibili	1	€ 2,00	€ 2		€ 2	
Termristori	4	€ 3,00	€ 12		€ 12	
Estrusore	1	€ 120,00	€ 120		€ 120	http://www.lulzbot.com/?q=products/budaschnozzle-12-w-05mm-nozzle
Cuscinetti lineari	12	€ 4,00	€ 48		€ 48	http://www.igus.it/wpck/default.aspx?Pagename=igubal_Stehlager_KST
Trascinatore filo	1	€ 11,00	€ 11		€ 11	http://shop.arcol.hu/item/mini_hyena_5mm
Pulegge	2	€ 4,00	€ 8		€ 8	http://reprapworld.com/?products_details&products_id=325&cPath=1595_1639
Cinghie T2.5	2	€ 3,50	€ 7		€ 7	http://it.aliexpress.com/wholesale/wholesale-polyurethane-timing-belt.html

Plastiche	1	€ 50,00	€ 50		€ 50	http://www.ebay.it/sch/sis.html?_nkw=Prusa%20Mendel%20i2%20RepRap%20Jonaskuehling%20Extruder%203D%20Printer%20Juego%20completo&_itemId=271201886688
Ferramenta: dadi,barre	1	€ 50,00	€ 50		€ 50	
TOTALE					627€	

Conclusioni

Il mondo del R.P. è un mondo in piena evoluzione, come lo fu per le stampanti a getto d'inchiostro. In un primo momento il costo le rendeva inaccessibili, ma con il progredire della tecnologia e la diminuzione dei costi di realizzazione le stampanti a getto di inchiostro furono presto accessibili a tutti. La storia si ripeterà anche per le stampanti 3D. Aziende come la Makerbot hanno già conquistato una considerevole fetta di mercato. Il costo di queste stampanti 3D "d'ufficio" si aggira intorno alle 2500 € e i prototipi realizzabili hanno caratteristiche superficiali e meccaniche davvero notevoli con dimensioni che si aggirano intorno ai 200x200x200mm.

Per quanto concerne il progetto RepRap, la sua versatilità lo rende un ottimo trampolino di lancio verso il mondo del Rapid Prototyping, senza contare il fatto che ha un ottimo potenziale paragonabile alle macchine pre-assemblate in commercio.

Nel §3.2 si era accennato al fatto che molti pezzi derivanti dallo smantellamento della Lom Helisys 1015 siano riutilizzabili nel progetto RepRap. Nella tabella seguente si elencano i pezzi prelevati dalla Lom Helysis 1015 e la loro finalità di utilizzo nel progetto RepRap:

Comp. recuperato dalle Helisys 1015	**Immagine**	**Finalità di utilizzo nel progetto RepRap**
Motori passo-passo da 200step/giro con annesso encoder, e puleggia di trasmissione. (3 pez.)		Movimentazione asse X e Y, inoltre grazie all'utilizzo degli encoder si potrà avere un controllo in retroazione anche sulla movimentazione (ved.§4.3). (Richiesti 2 pez)
Barra trapezoidali con annessa chiocciola a ricircolo di sfere. (1 pez.)		Anziché compiere la movimentazione lungo l'asse Z mediante due barre filettate usando una barra trapezoidale e 2 barre lische di guida si ottiene lo stesso risultato, se non migliore.

Piano portapezzo con annesso dispositivo di regolazione.		Piano portapezzo, basterà rimuovere il pannello in alluminio (nella foto quello forato) e aggiungerci un piano riscaldante.
Dispositivo di termoregolazione per il rullo. Ha 3 entrate per il controllo mediante termistori e 3 uscite per alimentare termo resistori.		Il progetto richiede solo 2 entrate date dai termistori per il controllo della temperatura dell'estrusore e del piano riscaldante, mentre richiede solo 2 uscite per termo resistori: una è per l'estrusore e una è per il piano riscaldante.

Con questi pezzi è possibile realizzare quindi una stampante 3D RepRap con un volume di stampa notevolmente maggiorata rispetto alla RepRap esposta nel capitolo 4.

Ci sarebbe però un altro modo di riutilizzare il vecchio macchinario Lom, si potrebbe infatti procedere ad una vera e propria conversione da tecnologia Lom a tecnologia Fdm. Tutta la struttura e le componenti sia di movimentazione e di trasmissione della Lom Helisiys 1015 hanno lo stesso principio di funzionamento della RepRap. Ovviamente tutto il cablaggio originale andrebbe rimosso sostituendolo con uno completamente nuovo e adatto alla tecnologia Fdm, il sistema di specchi e il generatore laser andrebbero tolti e al posto del tunnel focale verrebbe posto un estrusore. A differenza del progetto RepRap ora l'estrusore non si muoverebbe più lungo l'asse Z e l'asse X bensì lungo gli assi X ed Y lasciando al piano portapezzo la movimentazione lungo l'asse Z (il sistema di riferimento a cui ci si riferisce è quello descritto nel §4.2).

Bibliografia e sitografia

Bibliografia:

- Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid, 2010, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, fifth edition, Singapore: Pearson.
- Chua C.K., Leong K.F, Lim C.S., 2010, *Rapid prototyping: Principles and applications*, third edition, New Jersey: World Scientific.
- Robert N. Anthony and David F. Hawkins, 2008, *Test and Cases*, second edition, Milano: McGraw-Hill.
- Giuseppe Veltrone, 2006, Macchine per allievi ingegneri, seconda edizione, Padova: Libreria Internazionale Cortina.
- Emilio Chirone, Stefano Tornincasa, 2006, Disegno Tecnico Industriale 2, prima edizione, Torino: Il Cpitello.

Siti consultati:

- Associazione italiana prototipazione rapida (http://www.apri-rapid.it/).
- 3D System web site (http://www.3dsystems.com/).
- Reprap project (http://www.reprapworld.com/).
- Cubic Technologies (http://www.cubictechnologies.com/)
- AmoRetro components (http://www.amoretro.de/).

Ringraziamenti

Ringrazio prima di tutto i miei genitori per avermi dato la possibilità di compiere questi studi, e per l'anno extra che mi hanno concesso.

Ringrazio il Prof. Berti per avermi fatto da relatore e per avermi dato l'opportunità di conoscere da vicino il mondo del R.P..

Ringrazio inoltre Anna, mia sorella, per i consigli e l'impaginazione di questa tesi.

Ringrazio i ragazzi Plumake: Riccardo Bertagnoli e Fabio Righetti per il tempo dedicatomi e per avermi reso partecipe dei vostri progetti.

Ringrazio la mia dolce Valentina per avermi dato una mano a compilare l'infinità di scartoffie per la domanda di laurea e per essere stata un esempio da seguire per quanto riguarda studio e dedizione!

Ringrazio anche Gloria e Giacomo per le chiacchierate nel dopo pranzo, alla solita ora, nel solito posto sotto ogni genere di intemperie.

Ringrazio i miei colleghi universitari, in particolare: Massimo per avermi fatto apprezzare il tennis e per essere l'interista maledetto (ps: ricordati che con Nadal non c'è Dokovic che tenga, VAMOOOOSSSSSS); Alessio per tutti i tragitti casa-università fatti insieme, per aver suonato a qualsiasi cosa vedessimo per la strada e per tutti i trattori che mi ha fatto conoscere ed osservare; Lorenzo per tutti i video delle drag race e non solo (ps: Rotta fa schifo!) e per tutte le cicche scroccate (buone come le sue è difficile trovarle); Davide, il secondo interista maledetto, che ha cambiato il buon giorno di tutti noi usando delle immagini e che ha conquistato quasi tutte le fighe di Vicenza (ps: Buchetto ti saluta).